Recycling von Photovoltaikmodulen im regionalen Kontext

Theoretische Grundlagen, desiderate Rahmenbedingungen und prävalierende Hemmnisfaktoren

Von der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät

der Universität Leipzig

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(akademischer Grad)

Dr.-Ing.

(Kurzform)

vorgelegt

von Diplom-Wirtschaftsingenieur Felix Heckler

geboren am 26.06.1984 **in** Leipzig

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Robert Holländer
Prof. Dr. Erik Gawel
Prof. Dr. rer. nat. Thomas Bruckner
(Vorsitzender der Promotionskommission)

Tag der Verleihung: 08.05.2019

Einrichtung / Institut	Professur
Universität Leipzig *Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät* Institut für Infrastruktur und Ressourcen-management	Umwelttechnik und Umweltmanagement, VWL / Institutionenökonomische Umweltforschung
Bearbeiter Felix Heckler	**Betreuer der Arbeit** Prof. Dr.-Ing. Robert Holländer Prof. Dr. Erik Gawel

Titel der Arbeit

Recycling von Photovoltaikmodulen im regionalen Kontext

Art der Arbeit	Datum	Quellenangaben	Tab. und Abb.	Anlagen	Seitenzahl
Dissertation	10.11.2017	362	238 (79+159)	26	818 (54+764)

Kurzfassung / Abstract

Die vorliegende Arbeit behandelt das Recycling von Photovoltaikmodulen – speziell aus der Gruppe der kristallinen Siliziumsolartechnologie. Dabei kommt der Analyse grundlegender Zusammenhänge sowie der Generierung einer auch für nachfolgende Forschungsansätze desideraten Datenbasis zentraler Stellenwert zu. Hierfür werden sowohl die technologische, die rechtliche und die ökonomische Ebene auf etwaige prävalierende Hemmnisfaktoren oder die Existenz von hemmenden Restriktionen hin untersucht als auch regionale Fragestellungen und diesbezügliche Rahmenbedingungen adressiert. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei insbesondere der Konnex zwischen regionalen Gegebenheiten und der aufgedeckten gegenwärtigen Disproportionalität aus der verfahrenstechnischen Realisierbarkeit und dem realen Anwendungsspektrum betrachtungsrelevanter Recyclingaktivitäten. Um den Untersuchungsgegenstand adäquat zu bearbeiten, wurde ein Prognosemodell zur Prädiktion annueller Altmodulströme auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse und aktueller Erfahrungswerte entwickelt, welches zudem nach technologischem Ansatz differenziert und regional uneingeschränkt arbeitet. Darauf aufbauend, aus der Modifikation eines finanzmathematischen Entscheidungskriteriums, der Anwendung von Optimierungsansätzen und der Kenntnis potenzieller Veränderungen des grundlegenden Aufbaus eines definierten Standardsolarmoduls infolge produktionskostengetriebener Marktumbrüche konnten letztlich multiple aber szenariengebundene Hemmnisfaktoren identifiziert werden. Aus dem ganzheitlichen Betrachtungsansatz von Produktion und Recycling gelang darüber hinaus eine Kalkulation idealisierter energetischer und materieller Einsparpotenziale eines Recyclingansatzes im Vergleich zur Durchflusswirtschaft. Gleichwohl konnte, basierend auf den Ergebnissen, ein weiterer Forschungsbedarf abgeleitet und empfohlen werden.

Schlagworte

Photovoltaik, Recycling, Sachsen, kristalline Siliziumsolarmodule, Altmodulprognose

Lebenslauf



Felix Heckler

*26.06.1984 in Leipzig

Coppistraße 4a
04129 Leipzig
Tel.: 0157/75757235
Email: HecklerFelix@web.de

Wissenschaftlicher Werdegang

seit 01/2015

Gastwissenschaftler an der Universität Leipzig:

- Promotionsvorhaben
  „Recycling von Photovoltaikmodulen im regionalen Kontext“
- Durchführung der Übung der Lehrveranstaltung:
  „*Emissionen und Luftreinhaltung“*

10/2012 – 12/2014

- Vertreter und Sprecher der Nachwuchsforschergruppe:
  „*RegAWa – Regionale Anpassung an den globalen Wandel*“
- wissenschaftlicher Mitarbeiter an den Lehrstühlen
  Umwelttechnik/Umweltmanagement
  VWL / Institutionenökonomische Umweltforschung
  der Universität Leipzig

Veröffentlichungen / Beiträge

Discussion Paper

06/2014

- Evolution der PV-Märkte: Globale Historie, nationale Besonderheiten und regionaler Anlagenbestand

08/2013

- Literaturanalyse: Recycling für PV-Module – die technologischen Grundlagen

Posterausstellung

04/2017

- Ideenwettbewerb „Neue Wege gehen“

Beiträge

11/2015

- Photovoltaikrecycling im ostdeutschen Produktionscluster – ein Beitrag zu einer nachhaltigen regionalen Entwicklung?
  Beitrag zur Festschrift anlässlich des zehnjährigen Bestehens des Instituts für Infrastruktur und Ressourcenmanagement (IIRM): Zehn Jahre transdisziplinäre Nachhaltigkeitsforschung an der Universität Leipzig.

Studium

10/2004 – 09/2011 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Diplomstudiengang Wirtschaftsingenieurwesen (Gesamtnote: 1,8)

Studienrichtung: Verfahrenstechnik
Betriebswirtschaftslehre

Spezialisierung: Umweltschutztechnik
Verfahrensoptimierung
Produktion und Logistik

Studienarbeit: Laborversuche zur Minderung des thermisch mobilisierbaren Quecksilbers aus REA-Gips.

Diplomarbeit: Zur Überwachung von Emissionen aus Kraftwerken: Validierung der Quecksilber-Adsorptionskapazität von Dowex-Harzen (Note: 1,3)

WS 2008/2009 Praxisseminar „Interdisziplinäre wissenschaftliche Beratung In der Prozessindustrie - Problemanalyse bei The DOW Chemical Company"

Studienbegleitende Praktika

04/2010 – 10/2010 Praktikum bei Heppe Medical Chitosan GmbH

06/2009 – 03/2010 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- Hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl *Automatisierungstechnik* zur Datenbankpflege

Außeruniversitäre Weiterbildungen

05/2012 – 08/2012 Intensivkurs: *„Englisch für den Beruf"* bei der Sprachschule Berlitz Deutschland GmbH

Schulbildung

1995 – 07/2003 Abitur am Friedrich-Schiller-Gymnasium Leipzig (Gesamtnote: 2,2)
Naturwissenschaftliches Profil mit den Leistungskursen:
- Mathematik
- Physik

Leipzig, .11.2017 Felix Heckler

Erklärung gemäß § 8 Absatz 2 (Nummer 1 und 2) der Promotionsordnung der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Leipzig vom 12.10.2010

Hiermit erkläre ich in Anlehnung an § 8 Absatz 2 Nummer 1 der Promotionsordnung vom 12.10.2010 der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Leipzig, dass die vorgelegte Dissertation ohne unzulässige Hilfe, insbesondere ohne die Inanspruchnahme eines Promotionsberaters, und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde und dass die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken in der Arbeit als solche kenntlich gemacht worden sind.

Weiter erkläre ich in Anlehnung an § 8 Absatz 2 Nummer 2 der Promotionsordnung vom 12.10.2010 der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Leipzig, dass die vorgelegte Dissertation weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zwecke einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt und insgesamt noch nicht veröffentlicht wurde.

_____	_____
Ort, Datum	Unterschrift

Auch Photovoltaikmodule halten *nicht* ewig.

VORWORT

Das Recycling von Photovoltaikmodulen – was auf den ersten Blick leicht greifbar erscheint, stellt sich bei genauer Betrachtung als komplexe Kombination der beiden zukunftsträchtigen Technologiebranchen Photovoltaik und Recycling dar. Dies bestätigte sich nicht nur in der langjährigen Bearbeitung der Thematik, sondern auch in zahlreichen Gesprächen mit Experten, Vertretern aus Industrie und Wirtschaft oder interessierten Kollegen. Die grundlegenden Definitionen der zentralen Begrifflichkeiten Photovoltaik und Recycling dienten dabei nicht selten als erster „Eisbrecher" hin zu einem Dialog. „Photovoltaikmodule? Das ist doch die Erzeugung von Strom aus Sonnenstrahlung." Darüber, oder wissenschaftlich ausgedrückt: die direkte Umwandlung von Teilen des solaren Strahlungsspektrums in elektrische Energie und dementsprechend die technische Nutzung des photovoltaischen Effektes, herrschte zumeist schnell Einigkeit. Auch die Verbindung zum Recycling fiel größtenteils leicht: „Was soll denn sonst mit ausgedienten Photovoltaikmodulen nach deren Nutzungsphase passieren?" Spätestens hier transformierte sich der Dialog jedoch in einen vom Autor dieser Arbeit geführten Monolog, weil eine gezielte Spitze, wie die vorerst philosophisch klingende aber grundlegende Frage: „Ist ein Photovoltaikmodul gleich ein Photovoltaikmodul?", dem bislang interessierten Gesprächspartner bereits an dieser Stelle eine ungeahnte aber nolens volens anstehende Tiefe der weiteren Diskussion signalisierte.

Genau diese Frage ist es jedoch, die sowohl zentrale Aspekte der vorliegenden Arbeit adressiert als auch, aus Sicht des Autors, qualitativ adäquate Quellen von wissenschaftlich ungenauen oder, mit Verlaub, vereinzelt auch fragwürdigen Arbeiten unterscheidet; zumindest sofern kein systemischer Ansatz gewählt wurde. Die Differenzierung der einzelnen Ansätze, Variationen und Konzeptionen innerhalb der Photovoltaiktechnologie ist desiderate Basis für die Betrachtung hochwertiger Recyclinglösungen, welche die Funktionsmaterialien einbegreifen. Allein die begriffliche Klassifizierung in beispielshalber kristalline Siliziumsolarmodule, Cadmiumtelluridsolarmodule oder sogenannte CIGS/CIS-Solarmodule macht bereits die Existenz von Unterschieden deutlich. Diese Unterschiede sind allerdings substanzieller Natur, da einerseits alle Photovoltaikmodule per Definition eine photoaktive Schicht als zentrales Bauelement nutzen, andererseits

sich genau hieran die namensgebenden Unterscheidungsmerkmale in der stofflichen Zusammensetzung äußern. Mit der heterogenen Umsetzung der technischen Realisierung des photovoltaischen Effektes können sich Photovoltaikmodule zudem erheblich in der gesamten materiellen Zusammensetzung und der Art und Weise, wie die einzelnen Ingredienzien verarbeitet wurden – folglich in den zugrunde liegenden Produktionsprozessen – unterscheiden. Es gibt sonach nicht *die* Photovoltaik. Vielmehr existieren konkurrierende Ansätze welche in der Konsequenz völlig heterogene Anforderungen an jenes, die Funktionsmaterialien berücksichtigendes, Recycling stellen.

Wenn sich nicht bereits an dieser Stelle die enorme Komplexität der Thematik offenbarte, dann spätestens mit der nächsten und ähnlich philosophisch anmutenden Konkretisierung des Betrachtungsgegenstandes. „Kann aus einem Photovoltaikmodul ein Photovoltaikmodul entstehen? Und, welche Recyclingstrukturen wären entsprechend zu etablieren?“ Hierfür ist es von essenzieller Bedeutung zuvörderst zentrale Termini zu klären und dem Gesprächspartner oder, im vorliegenden Fall, dem Leser bereitzustellen. Dabei dient der Begriff „Recycling“ in Fachkreisen als Hyperonym für sämtliche Kombinationen aus den Begrifflichkeiten „Verwendung“ und „Verwertung“, welche auf den Output etwaiger technologischer Maßnahmen zur Rückgewinnung der Bestandteile eines Altmoduls abzielen, mit den beiden Affixen „Wieder-“ und „Weiter-“, die den potenziellen Absatzmarkt des Prozessoutputs spezifizieren. Eine genaue Unterteilung findet sich entsprechend im zentralen Kapitel über das Recycling.

Aufgrund des noch jungen Forschungsfeldes und den geringen Erfahrungswerten mit der terrestrischen Applikation von Photovoltaikmodulen sind beide vorbezeichneten Fragestellungen jedoch bislang entweder gar nicht und wenn, nur in Teilen oder unbefriedigend beantwortet. Obgleich sich die vorliegende Arbeit vordergründig an Wissenschaft, fachspezifische Experten, Industrie und Wirtschaft richtet, soll sie auch dem Laien sowie dem geneigten oder interessierten Leser einen Einstieg in die Thematik ermöglichen und zur Klärung der angeführten Aspekte und Spezifika beitragen. Sollten beim Leser keine Vorkenntnisse oder Berührungspunkte vorhanden und grundlegende Begriffe wie „photovoltaischer Effekt“, „solares Strahlungsspektrum“ oder „pn-Übergang“ bisweilen unbekannt sein, ist der Einstieg im Kapitel der physikalischen Grundlagen nachdrücklich zu empfehlen. Dies schafft die Grundlage zum Verständnis der restlichen Kapitel und trägt dabei gleichwohl zur Vermeidung späterer Missverständnisse bei. Wer indessen darüber hinaus mit der Differenzierung innerhalb der Photovoltaiktechnologie in bei-

spielshalber kristalline Siliziumsolarzellen, photoaktive Schichten aus Cadmiumtellurid oder CIGS vertraut ist, kann selbst die desiderate Beschreibung der Zellentechnologien gegebenenfalls nur zur nachträglichen Erläuterung spezifischer Fragen nutzen. Experten auf dem Gebiet der Photovoltaiktechnologie hingegen, welche sowohl die Evolution der Photovoltaikmärkte samt globaler Installationshistorie, nationalen Besonderheiten und regionalem Anlagenbestand kennen als auch mit der Produktionstechnologie zur Fertigung eines kristallinen Standardsiliziumsolarmoduls sowie den rechtlichen Aspekten oder Obliegenheiten eines Recyclings jener Module vertraut sind, können sich auch einzelne Abschnitte losgelöst von der Gesamtheit der Arbeit herausgreifen.

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei der Photovoltaik um eine sich stetig weiterentwickelnde Technologie. Dies umfasst nicht nur die technologischen Ansätze oder die Modulkonzeptionen, auch die grundlegenden Produktionssequenzen verändern sich zunehmend aufgrund des Kostendrucks. Dies wirkt sich in der Konsequenz auch auf etwaige verfahrenstechnische Ansätze für das Recycling der Solarmodule sowie die ökonomischen, ökologischen und rechtlichen Rahmenbedingungen aus. Es ist daher klar nachvollziehbar, dass die vorliegende Arbeit nur ein Momentum darstellen kann. Dementsprechend sind etwaige Ergebnisse an sich eventuell ändernde Rahmenbedingungen kontinuierlich anzupassen. Dies gilt auch für einen Bezug der Ergebnisse dieser Arbeit auf Erkenntnisse oder Quellen, welche möglicherweise nach Beendigung der Recherchearbeit veröffentlicht wurden. „Stichtag“ ist der November 2015, welcher für alle Statistiken und wissenschaftlichen Publikationen gilt. Experteninterviews, Gespräche oder gezielte nachträgliche Konkretisierungen infolge substanziell geänderter Rahmenbedingungen sind indessen von dieser Restriktion nicht betroffen.

Sicher ist hingegen, dass mit den regional installierten Photovoltaikanlagen unterschiedlichster Dimensionierung und Art auch die in den einzelnen Modulen mitunter hochwertigen Funktionsmaterialen örtlich gebunden vorliegen. Stand 01.01.2014 trifft dies beispielshalber in der Region Sachsen samt deutschseitiger Anrainer inklusive Berlin auf 573.657 Photovoltaikanlagen zu. Mittels geeigneter Recyclingstrukturen können diese möglicherweise als regionales Rohstoffpotenzial angesehen werden, denn zuwider anderweitigen Behauptungen, und damit gingen alle Gesprächspartner abschließend immer konform, halten auch Photovoltaikmodule *nicht* ewig.

Die Erstellung der vorliegenden Arbeit wäre nicht ohne das Wohlwollen von Herrn Prof. Holländer und Herrn Prof. Gawel möglich gewesen. Neben der initialen Entscheidung mir im Rahmen des vom ESF geförderten Kooperationsprojektes „RegAWa: Regionale Anpassung an den globalen Wandel - Ökonomische Instrumente zur Sicherung von Nachhaltigkeit“ ihr Vertrauen zu schenken und mir so auch über die Jahre eine persönliche und fachliche Entfaltung zu ermöglichen, danke ich Ihnen dafür, dass Sie mir stets Rückhalt in einem mir unbekannten Umfeld gegeben haben. Dazu zählen nicht vordergründig die fachlichen Ratschläge, die zwar ab und an notwendig wurden, vielmehr danke ich Ihnen vor allem für die Unterstützung über das Kooperationsprojekt „RegAWa“ hinaus. Sehr geehrter Herr Prof. Holländer, auch wenn in dieser Form unüblich, möchte ich Ihnen in persönlicher Weise danken. Was als Kleinigkeit gedeutet werden kann, hat entscheidend zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen und stellt aus meiner Sicht keine Selbstverständlichkeit dar. Dies begreift insbesondere die uneingeschränkte Nutzung und in diesem Zusammenhang auch die Duldung eines mitunter chaotisch anmutenden Arbeitsplatzes ein. Speziell aber auch der persönliche Einsatz für eine Folgefinanzierung, ohne die ein Abschluss der Arbeit kritisch zu bewerten wäre, stellt für mich keinen alltäglichen „Gefallen“ dar.

An dieser Stelle möchte ich mich auch, aber nicht nur für die finanzielle Unterstützung, bei der Friedrich-Naumann-Stiftung für die Freiheit bedanken - eine Stiftung, die den liberalen Grundgedanken nicht auferlegt, sondern lebt.

Dank gebührt auch meinen Kollegen, vor allem jedoch Herrn Minar und Herrn Frey sowie meinen ehemaligen „Tischnachbarn“ für das stets offene Ohr hinsichtlich aller von der Dissertation losgelösten Belange und der Toleranz meiner Eigenheiten.

Neben Freunden und Familie, die mir auch ein Leben abseits der Arbeit ermöglichten und mir so die benötigte Kraft und Ausdauer gaben, danke ich insbesondere meinen Eltern und ausdrücklich meiner Frau Ina.

Ihr danke ich von Herzen. Nicht nur für die unzählbaren Entbehrungen, die Sie aus Liebe zu mir eingegangen ist, auch für Ihre andauernde Unterstützung in allen Lebenslagen und –bereichen. Einzig gegen die Geheimratsecken, die mit solch einem Unterfangen anscheinend naturgemäß einhergehen, konnte auch Sie nichts machen. Trotz 217.610 geschriebener Wörter gelingt es mir nun leider nicht, meine Dankbarkeit Dir gegenüber in Worte fassen. Was ich aber sagen kann, ist: Ich liebe Dich.

Leipzig, November 2017 Felix Heckler

INHALTSÜBERSICHT

INHALTSVERZEICHNIS XVII

TABELLENVERZEICHNIS XXV

ABBILDUNGSVERZEICHNIS XXIX

ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS XXXVII

1. EINFÜHRUNG 1

1.1 UNTERSUCHUNGSSCHWERPUNKTE 2

1.2 FORSCHUNGSBEITRAG UND AUFBAU DER ARBEIT 6

1.3 LITERATURANALYSE UND STAND DER WISSENSCHAFT 10

1.4 BESTÄTIGUNG DER FORSCHUNGSLÜCKE UND METHODIK 23

2. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN 27

2.1 HALBLEITER 29

2.2 EXTRATERRESTRISCHE SONNENSTRAHLUNG 50

2.3 VERÄNDERUNG DES SONNENSPEKTRUMS IN DER ERDATMOSPHÄRE 53

2.4 GLOBALSTRAHLUNG 61

2.5 LICHTABSORPTION 67

3. SOLARZELLENTECHNOLOGIEN 77

3.1 DER PHOTOVOLTAISCHE EFFEKT 79

3.2 ÜBERBLICK DER VERSCHIEDENEN TECHNOLOGIEN 85

3.3 EVOLUTION DER KRISTALLINEN SILIZIUMSOLARZELLE 88

3.4 DÜNNSCHICHTZELLENTECHNOLOGIE 117

4. PRODUKTION 149

4.1 GESCHICHTE DER PHOTOVOLTAIK 153

4.2 MÄRKTE FÜR PHOTOVOLTAIK 157

4.3 ANTEILE DER TECHNOLOGIEN 194

4.4 ABGRENZUNG DES WEITEREN UNTERSUCHUNGSRAHMENS 201

4.5 VOM SILIZIUMDIOXID ZUM KRISTALLINEN STANDARDSILIZIUMSOLARMODUL . 206

4.6 KRITISCHE ROHSTOFFE 301

4.7 ÜBERSICHT PRODUZENTEN 311

5. RECYCLING 321

5.1 RELEVANTE EUROPÄISCHE GESETZGEBUNG UND NATIONALE GESETZLICHE RESTRIKTIONEN 326

5.2 PROGNOSE DES MÖGLICHEN ALTMODULAUFKOMMENS 369

5.3 TECHNOLOGISCHE ANSÄTZE UND ERPROBTE VERFAHREN 456

5.4 ÖKONOMISCHE ASPEKTE 510

5.5 KONSTRUKTIONSBEDINGTE BEEINFLUSSUNGEN DER ÖKONOMISCHEN ASPEKTE 611

5.6 OPTIMIERUNGSANSÄTZE DER BESCHAFFUNGSLOGISTIK 629

6. IDENTIFIZIERTE HERAUSFORDERUNGEN UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF 645

6.1 PROBLEMATIK DER ZEITVERSCHIEBUNG ZWISCHEN PRODUKTIONS- UND RECYCLINGTECHNOLOGIEN 647

6.2 PROBLEMATIK DER FEHLENDEN VOLUMINA 651

6.3 WEITERE IDENTIFIZIERTE HEMMNISFAKTOREN UND HERAUSFORDERUNGEN ... 655

6.4 REGIONALER NUTZEN AUS DER ETABLIERUNG EINES RECYCLINGNETZWERKES 675

6.5 VOLKSWIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE 683

7. ZUSAMMENFASSENDE SCHLUSSBETRACHTUNGEN 691

LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS 700

ANHANG 730

INHALTSVERZEICHNIS

TABELLENVERZEICHNIS XXV

ABBILDUNGSVERZEICHNIS XXIX

ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS XXXVII

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND AKRONYME XXXVII
Allgemeine Kürzel XXXVII
Technischer oder physikalischer Charakter XXXIX
Physikalische / technische Grundlagen XXXIX
Zellen- und Modultechnologie XXXIX
Verfahrenstechnischer Bezug XL
Ökonomisch / wirtschaftliche Betrachtungen XLI
Ökologischer Bezug XLI
Rechtliche Aspekte XLII

BETRACHTETE VERORDNUNGEN UND GESETZE XLIII

SYMBOLVERZEICHNIS, INDIZES, KONSTANTEN UND GENUTZTE EINHEITEN XLV
Physikalische Symbole und Formelzeichen XLV
Symbole und Formelzeichen mit ökonomischen Bezug XLVII
Allgemeine Indizes L
Tiefgestellt L
Hochgestellt L
Konstanten LI
Standardmäßig verwendete Einheiten LI

VERZEICHNIS DER CHEMISCHEN ELEMENTE UND VERBINDUNGEN LIII

1. EINFÜHRUNG 1

1.1 UNTERSUCHUNGSSCHWERPUNKTE 2
1.1.1 Technologische Grundlagen 3
1.1.2 Recycling unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten 4
1.1.3 Regionale Fragestellungen 5

1.2 FORSCHUNGSBEITRAG UND AUFBAU DER ARBEIT 6

1.3 LITERATURANALYSE UND STAND DER WISSENSCHAFT 10
1.3.1 Physikalische Grundlagen 10
1.3.2 Solarzellentechnologien 13
1.3.3 Modul- und Anlagentechnik 15
1.3.4 Produktionstechnologien 17
1.3.5 Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule 19
1.3.6 Zusammenfassung und weitere Aspekte 21
1.4 BESTÄTIGUNG DER FORSCHUNGSLÜCKE UND METHODIK 23

2. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN 27

2.1 HALBLEITER 29
2.1.1 Bändermodell 30
2.1.2 Bereitstellung von Ladungsträgern in Halbleitern 33
2.1.2.1 Eigenleitung 33
2.1.2.2 Störstellenleitung 35
2.1.2.2.1 Störstellenleitung in n-dotierten Halbleitern 36
2.1.2.2.2 Störstellenleitung in p-dotierten Halbleitern 39
2.1.3 Ladungstransport 41
2.1.3.1 Feldströme 41
2.1.3.2 Diffusionsstrom 44
2.1.3.3 Gesamtstrom 45
2.1.4 pn-Übergang und Bildung der Raumladungszone 46
2.2 EXTRATERRESTRISCHE SONNENSTRAHLUNG 50
2.3 VERÄNDERUNG DES SONNENSPEKTRUMS IN DER ERDATMOSPHÄRE 53
2.3.1 Absorption in der Erdatmosphäre 53
2.3.2 Reflexion 55
2.3.3 Rayleigh-Streuung 55
2.3.4 Mie-Streuung 56
2.3.5 Gesamtextinktion 57
2.3.6 Air Mass 58
2.4 GLOBALSTRAHLUNG 61
2.4.1 Modell der Sonnen-Volllaststunden 64
2.4.2 Standardtestbedingungen 65
2.5 LICHTABSORPTION 67
2.5.1 Antireflexionsbeschichtungen 72
2.5.2 Photoeffekt 75

3. SOLARZELLENTECHNOLOGIEN 77

3.1 DER PHOTOVOLTAISCHE EFFEKT 79

3.2 ÜBERBLICK DER VERSCHIEDENEN TECHNOLOGIEN 85

3.3 EVOLUTION DER KRISTALLINEN SILIZIUMSOLARZELLE 88
3.3.1 Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1960er 88
3.3.2 Die frühe 1970er „violet cell“ 91
3.3.3 Chemically textured non-reflecting „black cell” 93
3.3.4 Hocheffizienzzellen 98
3.3.4.1 Buried-Contact-Zelle 98
3.3.4.2 Rückkontaktzelle 99
3.3.4.3 PERL-Zelle 102
3.3.5 Betrachtungen zum Wirkungsgrad kristalliner Siliziumsolarzellen 106
3.3.5.1 Historische Entwicklung 106
3.3.5.2 Theoretische Begrenzung 108

3.4 DÜNNSCHICHTZELLENTECHNOLOGIE 117
3.4.1 HIT-Zelle 117
3.4.2 Zellen aus amorphem Silizium 119
3.4.2.1 Eigenschaften amorphes Silizium 120
3.4.2.2 pin-Struktur 124
3.4.2.3 Stapelzellen (Tandem- und Tripelzellen) 128
3.4.2.4 Zellen aus mikrokristallinem Silizium 132
3.4.3 Cadmiumtelluridzellen 135
3.4.4 Zellen aus der Gruppe CIS/CIGS – $Cu(In,Ga)Se_2$ 140
3.4.5 Serienverschaltung 145

4. PRODUKTION 149

4.1 GESCHICHTE DER PHOTOVOLTAIK 153
4.1.1 Allgemeine historische Daten 153
4.1.2 Terrestrische Applikation 154

4.2 MÄRKTE FÜR PHOTOVOLTAIK 157
4.2.1 Globale Betrachtungen 157
4.2.2 Europäische Erhebungen 163
4.2.3 Besonderheiten des deutschen Marktes 168
4.2.4 Regionale Entwicklungen 176
4.2.5 Zusammenfassung der Marktentwicklung 192

4.3 ANTEILE DER TECHNOLOGIEN 194

4.4 ABGRENZUNG DES WEITEREN UNTERSUCHUNGSRAHMENS 201

4.5 VOM SILIZIUMDIOXID ZUM KRISTALLINEN STANDARDSILIZIUMSOLARMODUL . 206
4.5.1 Vorbetrachtungen . 206
4.5.1.1 Modulbestandteile und Konzeption . 206
4.5.1.2 Allgemeine stoffliche Zusammensetzung Standardmodul . 211
4.5.2 Siliziumaufreinigung und Ingotherstellung . 216
4.5.2.1 Theoretische Grundlagen der Siliziumraffiniation . 216
4.5.2.1.1 Carbothermische Reduktion – MGS-Qualität . 216
4.5.2.1.2 Trichlorsilan und Siemensverfahren – EGS-Qualität . 218
4.5.2.1.3 Weitere Verfahren – SGS- und UMG-Qualität . 223
4.5.2.2 Grundlagen der Ingotherstellung . 226
4.5.2.2.1 Monokristallines Silizium . 226
4.5.2.2.2 Multikristallines Silizium . 229
4.5.2.3 Stoffliche und energetische Betrachtungen zur Siliziumaufreinigung und Ingotherstellung . 234
4.5.2.3.1 Siliziumaufreinigung . 234
4.5.2.3.2 Ingotherstellung . 238
4.5.2.3.3 CZ-Verfahren . 240
4.5.2.3.4 Kokillengussverfahren . 241
4.5.3 Waferfertigung . 242
4.5.3.1 Theoretische Grundlagen . 242
4.5.3.1.1 Ingotpräparation . 242
4.5.3.1.2 Vereinzelung zu Wafern . 244
4.5.3.2 Stoffliche und energetische Betrachtungen . 249
4.5.4 Produktion kristalliner Siliziumsolarzellen . 251
4.5.4.1 Theoretische Grundlagen . 251
4.5.4.2 Stoffliche und energetische Betrachtungen . 268
4.5.5 Fertigung Standardsolarmodul . 271
4.5.5.1 Theoretische Grundlagen . 272
4.5.5.2 Stoffliche und energetische Betrachtungen . 278
4.5.6 Zusammenfassende Betrachtungen zur Produktion von Standard-solarmodulen auf Basis der kristallinen Siliziumsolartechnologie . 280
4.5.6.1 Stoffliche Zusammensetzung des definierten Standardsolarmoduls . 287
4.5.6.2 Weitere Beziehungen zwischen der Produktion und der stofflichen Zusammensetzung eines Standardsolarmoduls . 296

4.6 KRITISCHE ROHSTOFFE . 301
4.6.1 Umwelteffekte und Gesundheitsgefährdungspotenziale . 301
4.6.2 Verfügbarkeit und Importabhängigkeit . 305

4.7 ÜBERSICHT PRODUZENTEN . 311

5. RECYCLING 321

5.1 RELEVANTE EUROPÄISCHE GESETZGEBUNG UND NATIONALE GESETZLICHE RESTRIKTIONEN 326
5.1.1 Richtlinie 2008/98/EG und KrWG 327
5.1.2 WEEE2 und ElektroG2 336
5.1.3 RoHS und ElektroStoffV 364
5.1.4 Abfallverbringungsverordnung und -gesetz 365
5.1.5 Weitere relevante Gesetzestexte 367

5.2 PROGNOSE DES MÖGLICHEN ALTMODULAUFKOMMENS 369
5.2.1 Theoretische Grundlagen 370
5.2.1.1 Produktionsausschuss und -abfall 371
5.2.1.2 Abfallaufkommen kurz vor und während der Nutzungsphase 378
5.2.1.3 Altmodule am Ende der Nutzungsphase 406
5.2.2 Prognose der jährlichen Altmodulströme 412
5.2.2.1 Prozentuale Betrachtungen 412
5.2.2.2 Absolute Betrachtungen 416
5.2.2.3 Sensitivitätsanalyse ausgewählter Parameter 436
5.2.2.4 Regionale Betrachtungen 444
5.2.2.5 Weitere Empfehlungen und Effekte eines Bestands- respektive Recyclingpotenzialkataster 454

5.3 TECHNOLOGISCHE ANSÄTZE UND ERPROBTE VERFAHREN 456
5.3.1 Status quo des Recyclings kristalliner Siliziumsolarmodule 462
5.3.2 Recyclingverfahren der SolarWorld AG 464
5.3.3 Recyclingansatz nach Park *et al.* 2016 473
5.3.4 Recyclingansatz der Loser Chemie GmbH 474
5.3.5 Recyclingverfahren der LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG 475
5.3.6 Recyclingansatz der Accurec Recycling GmbH 478
5.3.7 Recyclingansatz der Saperatec GmbH 480
5.3.8 Weitere Recyclingverfahren und -ansätze 481
5.3.9 Zusammenfassende Betrachtungen der Recyclingverfahren und -ansätze 487

5.4 ÖKONOMISCHE ASPEKTE 510
5.4.1 Einführende Betrachtungen und Funktionsherleitung 511
5.4.2 Erlösseite 514
5.4.2.1 Marktpreise und resultierender Einzelerlös 515
5.4.2.2 Absatzmärkte Sekundärrohstoffe 522

5.4.3 Kostenseite 526
5.4.3.1 Verfahrenskosten 526
5.4.3.2 Sammel- und Transportkosten 535
5.4.4 Mengenspezifik 554
5.4.4.1 Weitergabe von Produktionsabfällen 555
5.4.4.2 Zweitmarkt 557
5.4.4.3 Kapazitäten der Recyclingaktivitäten 559
5.4.5 Übergreifende Betrachtungen 566
5.4.5.1 Statisches Modell 575
5.4.5.2 Dynamisches Modell 579
5.4.5.3 Nettogegenwartswert 592
5.4.6 Ergebnisanalyse 607

5.5 KONSTRUKTIONSBEDINGTE BEEINFLUSSUNGEN DER ÖKONOMISCHEN ASPEKTE 611
5.5.1 Recyclingorientiertes Moduldesign 611
5.5.1.1 Einsatz von Zwischenfolien 613
5.5.1.2 Modifikation der Modulrahmung 613
5.5.1.3 Substitution des Verkapselungsmaterials 615
5.5.1.4 Regionalspezifische Modulkonzeption 616
5.5.2 Potenzielle Materialsubstitutionen und Reduktion spezifischer Ingredienzien 618
5.5.2.1 Zellen und Verbinder 618
5.5.2.2 Verkapselungsmaterial 624
5.5.2.3 Glas 625
5.5.3 Produkttypung 627

5.6 OPTIMIERUNGSANSÄTZE DER BESCHAFFUNGSLOGISTIK 629
5.6.1 Kurz- und mittelfristige Planungsphase 629
5.6.1.1 Sweep-Algorithmus 630
5.6.1.2 Savings-Verfahren 631
5.6.1.3 Zirkelmethode 632
5.6.1.4 Neuere Ansätze und weitere Aspekte 632
5.6.2 Langfristige Planungspahse 633
5.6.2.1 Erhöhung der Anlagenzahl 634
5.6.2.2 Integrierung einer Sortieranlage 636
5.6.2.3 Nutzung eines Zwischenlagers 637
5.6.2.4 Weitere Aspekte 639
5.6.3 Regionales Recyclingnetzwerk und sonstige Effekte 640

6. IDENTIFIZIERTE HERAUSFORDERUNGEN UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF 645

6.1 PROBLEMATIK DER ZEITVERSCHIEBUNG ZWISCHEN PRODUKTIONS- UND RECYCLINGTECHNOLOGIEN 647

6.2 PROBLEMATIK DER FEHLENDEN VOLUMINA 651

6.3 WEITERE IDENTIFIZIERTE HEMMNISFAKTOREN UND HERAUSFORDERUNGEN 655

6.3.1 Rechtliche Ebene 655

6.3.1.1 Fehlende stoffliche Anreize 655

6.3.1.2 Erweiterte Kennzeichnung 657

6.3.1.3 Produktverantwortung 659

6.3.1.4 Sonstige Aspekte 661

6.3.2 Technische Ebene 662

6.3.2.1 Verfahrensinput 662

6.3.2.2 Verfahrensoutput 665

6.3.2.3 Sonstige Aspekte 667

6.3.3 Ökonomische Ebene 668

6.3.3.1 Nettogegenwartswert 668

6.3.3.2 Recyclingnetzwerk 671

6.3.3.3 Sonstige Aspekte 673

6.4 REGIONALER NUTZEN AUS DER ETABLIERUNG EINES RECYCLINGNETZWERKES 675

6.4.1 Stärkung des ostdeutschen PV-Produktionsclusters 678

6.4.2 Schaffung einer Rohstoffsenke durch gezielten Altmodulimport 680

6.5 VOLKSWIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE 683

7. ZUSAMMENFASSENDE SCHLUSSBETRACHTUNGEN 691

LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS 700

KAPITEL 1 700

KAPITEL 2 703

KAPITEL 3 705

KAPITEL 4 709

KAPITEL 5 718

KAPITEL 6 728

ANHANG 730

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Bandabstände verschiedener Halbleiter in Elektronenvolt. 32

Tabelle 2-2: Eigenleitungsdichte verschiedener Halbleiter bei 300 Kelvin. 34

Tabelle 2-3: Dotierung eines Siliziumkristalls mit Arsen und die Besetzung der Orbitale. 36

Tabelle 2-4: Abstand der Energieniveaus der Donatoren von der Unterkante des Leitungsbandes in eV. 37

Tabelle 2-5: Abstand der Energieniveaus der Akzeptoren von der Oberkante des Valenzbandes in eV. 40

Tabelle 2-6: Zuordnung Majorität- und Minoritätsträger in Abhängigkeit der Dotierung 41

Tabelle 2-7: Wichtige Parameter des Systems Sonne – Erde. 51

Tabelle 2-8: Albedowerte in % für verschiedene Oberflächen. 55

Tabelle 2-9: Gegenüberstellung verschiedenen Halbleitermaterialien nach Art, Bandlücke und Absorptionskoeffizienten. 71

Tabelle 3-1: Wirkung des elektrischen Feldes an der Raumladungszone auf die Majoritäts- und Minoritätsträger 80

Tabelle 3-2: Beitrag eines freien Elektrons zum photovoltaischen Effekt in Abhängigkeit vom Absorptionsort. 81

Tabelle 3-3: Beitrag eines Lochs zum photovoltaischen Effekt in Abhängigkeit vom Absorptionsort. 81

Tabelle 3-4: Diffusionslängen ausgewählter Halbleiter 83

Tabelle 3-5: Geläufige Bezeichnungen verschiedener Dotierkonzentrationen. 86

Tabelle 3-6: Mittlere Reflexionsraten R für Silizium in Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung. 95

Tabelle 3-7: Technische Errungenschaften zur Minderung der Verlustarten nach Abbildung 3-17, unter Zuordnung zum Zellenkonzept mit dem sie eingeführt wurden. 113

Tabelle 3-8: Versatzmaterialien für hydriertes amorphes Silizium. 124

Tabelle 3-9: Akzeptor- und Donatorartige Defektzustände, wobei die Energienieveaus für die Akzeptoren von der Valenzbandoberkante und für die Donatoren von der Leitungsbandunterkante in eV angegeben sind 136

Tabelle 3-10: Prozessschritte der integrierten Serienverschaltung einer pin-Zelle in Superstratekonfiguration. 146

Tabelle 4-1: Die 10 globalen Zubaurekorde bis 2013. 159

Tabelle 4-2: Die 10 größten Märkte des jährlichen Kapazitätszubaus von 2010 bis 2013 im globalen Vergleich, Ländercode nach ISO 3166 Alpha-3 code. 159

Tabelle 4-3: Nationen mit kumulierter Kapazität von mindestens 1 GW_p 161

Tabelle 4-4: Neuinstallationen der Jahre 2012 und 2013 für innereuropäische Märkte mit einer kumulierten Kapazität von mehr als 1 GW_p im Jahr 2013. 166

Tabelle 4-5: Ziele der NREAPs der EU-Mitgliedsstaaten, die bis 2020 mindestens 1 GW_p kumulierte Leistung vorschreiben sowie deren kumulierte Kapazitäten 2013 und benötigte Zubauraten 167

Tabelle 4-6: Zeitraumabhängige relative Anteile installierter Kapazitäten an bundeslandspezifischen Gesamtkapazitäten mit Stand 2013. 181

Tabelle 4-7: Vergleich der jährlich neuinstallierten Kapazitäten in MW_p und Anlagenanzahlen der drei sächsischen Direktionsbezirke von 2009 bis 2013. 185

Tabelle 4-8: 2012 neu installierte Photovoltaikanlagen in der Stadt Leipzig samt 10 km Umland mit einer Einzelkapazität von mehr als 1 MW_p. 186

Tabelle 4-9: Jährliche Neuinstallationen in MW_p und Stück der betrachteten Region für den Zeitraum 2009 bis 2013 sowie Angabe der kumulierten Kapazitäten und der Anlagenzahl Stand 2013. 190

Tabelle 4-10: Designvariablen kristalliner Siliziumsolarmodule. 212

Tabelle 4-11: Gemittelte Werte einzelner Komponenten in Massen-% eines einseitig verglasten Solarmoduls auf Basis kristalliner Siliziumsolarzellen. 213

Tabelle 4-12: Typische Verunreinigungen von MGS nach der carbothermischen Reduktion im Lichtbogenofen. 217

Tabelle 4-13: Fraktionen von Chlorsilanen mit Angabe der Siedetemperatur. 219

Tabelle 4-14: Vergleich der Mindestanforderungen an den Gehalt ausgewählter Elemente für die Solarindustrie und UMG. 225

Tabelle 4-15: Verwendbarkeit von Silizium in unterschiedlichen Industriezweigen in Abhängigkeit der Güteklassen nur aus technologischer Sicht sowie aus kombinierter technoökonomischer Sicht. 233

Tabelle 4-16: Die benötigten Stoff- und Energieströme in der MGS-Produktion. 234

Tabelle 4-17: Desiderate Stoff- und Energieströme in der Produktion von polykristallinem SGS mittels des modifizierten Siemensprozesses. 237

Tabelle 4-18: Stoff- und Energieströme in der Herstellung monokristalliner SGS-Ingots. 240

Tabelle 4-19: Stoff- und Energieströme in der Herstellung multikristalliner SGS-Ingots. 241

Tabelle 4-20: Parameter unterschiedlicher Spezifikationen des Multidrahtsägeprozesses. 247

Tabelle 4-21: Stoff- und Energieströme in der Herstellung kristalliner Siliziumrohwafer. 250

Tabelle 4-22: Stoff- und Energieströme in der Produktion kristalliner Standardsiliziumsolarzellen. 269

Tabelle 4-23: Bestandteile der Pasten für den Siebdruck der Kontakte monokristalliner und multikristalliner Standardsiliziumsolarzellen, sowie verwendete Menge der kontaktspezifischen Druckpaste. 270

Tabelle 4-24: Stoff- und Energieströme in der Fertigung kristalliner Standardsiliziumsolarmodule. 278

Tabelle 4-25: Zusammenfassende Übersicht aller benötigten Stoff- und Energieströme der einzelnen Fertigungsstufen von der MGS Herstellung bis zur Produktion einer Einheit des definierten Standardsolarmoduls sowie die Angabe der kumuliert benötigten Energie- und Stoffströme über alle Fertigungsstufen. (gerundete Werte) 281

Tabelle 4-26: Zusammenfassung aller Einzel- und kumulierten Produktionsmultiplikatoren der Surrogate der verschiedenen Fertigungsstufen in der Betrachtungsebene Silizium bezüglich einer Einheit des ausgewiesenen Endproduktes. (gerundete Werte) 285

Tabelle 4-27: Relevante Einzel- und kumulierten Inhaltsstoffmultiplikatoren der verschiedenen stoffspezifischen Einbringungsstufen in der Betrachtungsebene Silizium bezüglich einer Einheit $gSSM_{sc/mc}$. 288

Tabelle 4-28: Zusammenfassende Übersicht aller nach Art und Quantität in einem $gSSM_{sc/mc}$ enthaltenen, beziehungsweise in Abhängigkeit der Einbringungsstufe in ein $gSSM_{sc/mc}$ eingehende Erzeugnishauptstoffe und Erzeugnisnebenstoffe. (gerundete Werte) 290

Tabelle 4-29: Zusammenfassende Übersicht der stoff- und stufenspezifischen Werte ME, MV, SE und SV sowie aller zu deren Berechnung benötigten Variablen für die Erzeugnishaupt- und Erzeugnisnebenstoffe sowie der relevanten Fertigungsstufen. 299

Tabelle 4-30: Alle nach Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 kennzeichnungspflichtigen Repetierfaktoren zur Herstellung eines $gSSM_{sc/mc}$ mit den zugehörigen GHS-Piktogrammen. .. 303

Tabelle 4-31: Zuordnung der Ausprägung des langfristigen Versorgungsrisikos der deutschen Wirtschaft (branchenübergreifend) mit für ein $gSSM_{msc/mc}$ produktionsrelevanten Rohstoffen verschiedener Studien..... 309

Tabelle 4-32: Führende PV-Produzenten in Deutschland geordnet nach Fertigungsebene mit ihren jeweiligen Produktionskapazitäten für 2012 bis 2014 und den tatsächlich produzierten Mengen in den Jahren 2012 und 2013 312

Tabelle 4-33: Führende PV-Produzenten des ostdeutschen PV-Produktionsclusters geordnet nach Fertigungsebene mit ihren jeweiligen Produktionskapazitäten für 2013 bis 2014 sowie der im Jahr 2013 tatsächlich produzierten Menge und der berechneten herstellerspezifischen Auslastung. 317

Tabelle 5-1: Zusammengefasste und geordnete Übersicht der im Anhang V der RL 2012/19/EU aufgeführten Mindestzielvorgaben für die Verwertung jeweils der Gerätekategorie 4. 343

Tabelle 5-2: Zusammenfassung der betrachtungsrelevanten Obliegenheiten bezüglich des Inverkehrbringens, der Sammlung und Rücknahme sowie der Behandlungs- und Verwertungspflichten aller Akteure nach den Vorgaben des ElektroG2. 362

Tabelle 5-3: Zusammenfassende Übersicht aller betrachtungsrelevanten Produktionsausschussraten in Prozent. 377

Tabelle 5-4: Zusammenfassung aller für das Abfallaufkommen kurz vor und während der Nutzungsphase eines kristallinen Siliziumsolarmoduls geschätzten prozentualen Eintrittswahrscheinlichkeiten der zeitraumspezifischen Defektarten, die einen Austausch betroffener Module zeitigen. 405

Tabelle 5-5: Datenbasis mit Bezugspunkt und Fortgang für die Diskussion der absoluten Abfallprognose. 417

Tabelle 5-6: Gegenüberstellung der Angaben aus [PV CYCLE 2016] und Abbildung 5-14. 424

Tabelle 5-7: Zur Prognose der jährlichen Altmodulströme in der Beispielregion des ostdeutschen PV Produktionsclusters verwendete Postleitzahlengebiete. 446

Tabelle 5-8: Zur Prognose der jährlichen Altmodulströme in der Beispielregion des Raumes Leipzig, Halle (Saale), Bitterfeld-Wolfen verwendete Postleitzahlengebiete. 447

Tabelle 5-9: Aus dem Mittelwert der regionalen Abfallprognose sich ergebende Stoffströme der Einzelfraktionen eines $gSSM_{alt}$ exemplarisch für die Region Sachsen samt Anrainer inklusive Berlin im Zeitraum ab 2013 und den folgenden 40 Jahren. 458

Tabelle 5-10: Ergebnisse des Recyclings der Chevetogneanlage 470

Tabelle 5-11: Stärken und Schwächen der grundlegenden Verfahrensansätze zur Delaminierung kristalliner Siliziumsolaraltmodule. 489

Tabelle 5-12: Idealisiertes maximales absolutes und prozentuales Einsparpotenzial im Falle einer Wiederverwendung des Glases, Aluminiumrahmens und der Wafer aus dem Recycling zur Wiederverwendung. 494

Tabelle 5-13: Idealisiertes maximales absolutes und prozentuales Einsparpotenzial im Falle des Recyclings zur Verwertung und einer Wiederverwertung der Altzellen als SGS_p. 502

Tabelle 5-14: Idealisiertes maximales absolutes und prozentuales Einsparpotenzial im Falle des Recyclings zur Verwertung und einer Wiederverwertung der Altzellen als MGS. 504

Tabelle 5-15: Vergleich der idealisierten maximalen prozentualen Einsparpotenziale für die Wiederverwendung der Altzellen als kristalliner Siliziumrohwafer, deren Wiederverwertung als SGS_p und der Wiederverwertung als MGS mittels des Recyclingverfahrens der SolarWorld AG. 506

Tabelle 5-16: Einzelerlöse und potenzieller Gesamterlös aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ zur Verwendung. 517

Tabelle 5-17: Einzelerlöse und potenzieller Gesamterlös aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ zur Verwertung. 520

Tabelle 5-18: Zusammenfassung adäquat verfügbarer Einzelwerte von Kosten für das Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule inklusive Quelle, Umrechnung und Vergleichswerten. 528

Tabelle 5-19: Übersicht der potenziellen Standorte für die Standortoptimierung inklusive Kennzeichnung und Zuordnung zur Tabelle 4-33 sowie Angabe der Zugehörigkeit zur jeweiligen Knotenmenge. 540

Tabelle 5-20: Entfernungsmatrix aller Knoten der beiden Knotenmengen q und r in km. 542

Tabelle 5-21: Charakteristische Werte kristalliner Siliziumsolaraltmodulströme für verschiedene Regionalisierungen. 561

Tabelle 5-22: Auslastung beziehungsweise Anzahl potenzieller Recyclingaktivitäten in Abhängigkeit der regionalen Bezugsgrenzen und der zugrunde liegenden jährlichen Anlagenkapazität 563

Tabelle 5-23: Sammel- und Transportkosten in € je Jahr für jeden potenziellen Recyclingstandort in Abhängigkeit der annuellen Bezugsmenge und der Auslegung des Fuhrparks. 586

Tabelle 5-24: Abgezinste Zahlungsströme in Einzelwerten für r_K = 3 % bezogen auf das entsprechende Betriebsjahr für 20 Jahre. 597

Tabelle 5-25: Kapitalwert in Abhängigkeit der Laufzeit einer Investition in Höhe von 2.500.000 € bei einem Kalkulationszinssatz von r_K = 3 % für 20 Jahre. 597

Tabelle 5-26: Kapitalwert in Abhängigkeit der Laufzeit bei einem Kalkulationszinssatz von r_K = 3 % und variierender Investitionssumme exemplarisch für eine Betriebszeit von 15 Jahren. 598

Tabelle 5-27: Maximale Investitionssummen für einen positiven Nettogegenwartswert in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes für den Fall der ewigen Rente sowie einer geplanten Laufzeit der Investition von 10 und 5 Jahren. 605

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Silizium in der vereinfachten Pauling-Schreibweise. 29

Abbildung 2-2: Energiebänder als elektromagnetische Wechselwirkung von n Energieniveaus. 30

Abbildung 2-3: Vereinfachte Darstellung der Energiebänder in einem Kristall. 31

Abbildung 2-4: Vereinfachte Darstellung der Energiebänder von Isolatoren, Halbleitern und Metallen. 32

Abbildung 2-5: Bandlücke von Ge, Si und GaAs als Funktion der Temperatur mit Wertetabelle. 33

Abbildung 2-6: Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit σ von sehr reinem (eigenleitenden) Ge und Si 35

Abbildung 2-7: Eigenleitungskonzentration einiger Halbleiter als Funktion der Temperatur 35

Abbildung 2-8: Arsendotierung eines Siliziumkristalls. 36

Abbildung 2-9: Vereinfachte Darstellung der Energiebänder bei einer n-Dotierung. 37

Abbildung 2-10: Ladungsträgerkonzentration Abhängigkeit der Temperatur. 38

Abbildung 2-11: Abhängigkeit der Leitfähigkeit σ von As-dotierten Si bei T = 300 K von der Arsenkonzentration N_D 38

Abbildung 2-12: Bordotierung eines Siliziumkristalls. 39

Abbildung 2-13: Vereinfachte Darstellung der Energiebänder bei einer p-Dotierung. 40

Abbildung 2-14: Temperaturabhängigkeit der Elektronen- und Löcherbeweglichkeit von Silizium für verschiedene Dotierkonzentrationen 42

Abbildung 2-15: Bildung der Raumladungszone in einem pn-Übergang (Teil 1). 46

Abbildung 2-16: Bildung der Raumladungszone in einem pn-Übergang (Teil 2). 47

Abbildung 2-17: Unsymmetrische Ausdehnung der Raumladungszone infolge ungleicher Dotierungen des pn-Übergangs. 48

Abbildung 2-18: Erstes und zweites Keplersche Gesetz, nicht Maßstabsgetreu. 50

Abbildung 2-19: Extraterrestrisches Strahlungsspektrum und Spektrum eines schwarzen Strahlers einer Temperatur von 6.000 K 52

Abbildung 2-20: Hauptabsorptionsgase in der Erdatmosphäre mit den jeweiligen Absorptionswirkungen in Abhängigkeit der Wellenlänge und der Gesamtabsorptionswirkung. 54

Abbildung 2-21: Veränderung des extraterrestrischen Strahlungsspektrums beim Durchgang durch die Erdatmosphäre. 57

Abbildung 2-22: Abhängigkeit der Weglänge der solaren Strahlung durch die Erdatmosphäre vom Sonnenhöhenwinkel φ. 59

Abbildung 2-23: Extinktionsintensität in Abhängigkeit des Sonnenhöhenwinkels. 60

Abbildung 2-24: Durchschnittlicher Jahresgang der Diffus-, der Direkt- und der Globalstrahlung an einem süddeutschen Standort. 61

Abbildung 2-25: Globalstrahlung in Deutschland als mittlere Monatssummen für März, Juli und November im Zeitraum 1981 bis 2010. 63

Abbildung 2-26: Jahressumme der Globalstrahlung für Deutschland im Jahr 2012 64

Abbildung 2-27: Direkte und indirekte Halbleiter im Bändermodell. 68

Abbildung 2-28: Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Eindringtiefe nach dem Absorptionsgesetz. 70

Abbildung 2-29: Materialspezifischer Absorptionskoeffizient in Abhängigkeit der Wellenlänge für verschiedenen Halbleiter. 70

Abbildung 2-30: Reflexionsraten in Abhängigkeit der Wellenlänge für unbeschichtetes Silizium, eine Siliziumoxidbeschichtung und eine Beschichtung mit Siliziumnitrid. 74

Abbildung 3-1: Trennung des entstandenen Ladungsträgerpaares durch das in der Raumladungszone vorherrschende elektrische Feld. 80

Abbildung 3-2: Lichtinduzierte Ladungsträgertrennung und die Anreicherung von Elektronen und Löchern in den jeweiligen Schichten. 82

Abbildung 3-3: Einteilung der Solarzellentechnologien. 85

Abbildung 3-4: Detailausschnitt des Aufbaus einer Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1960er. 89

Abbildung 3-5: Lage der Störstellenenergieniveaus in Abhängigkeit des jeweiligen Fremdatoms in einem Siliziumkristall. Gefüllte Striche repräsentieren Donatorenlevel; hohle Striche Akzeptorenlevel. Level über der Mitte der Bandlücke geben die Differenz zum Leitungsband an, die unterhalb der Bandlückenmitte die Differenz zum Valenzband. 90

Abbildung 3-6: Detailausschnitt des Aufbaus einer Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1970er "violet cell". 92

Abbildung 3-7: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer durch anisotropes Ätzen zufällig texturierten Zellenoberfläche. Abbildung aus [Szlufcik *et al.* 2003, S. 158]. 93

Abbildung 3-8: Wirkung einer texturierten Zellenoberfläche auf den reflektierten Strahlungsanteil. 94

Abbildung 3-9: Light Trapping in einer texturierten Siliziumsolarzelle mit optischen Reflektor an der Zellenrückseite. 95

Abbildung 3-10: Detailausschnitt des Aufbaus einer chemically textured non-reflecting "black cell". 96

Abbildung 3-11: Detailausschnitt des Aufbaus einer Buried-Contact-Zelle. 98

Abbildung 3-12: Detailausschnitt des Aufbaus einer Rückkontaktzelle. 100

Abbildung 3-13: Detailausschnitt des Aufbaus einer PERL-Zelle. 102

Abbildung 3-14: Evolution des Wirkungsgrades kristalliner Siliziumsolarzellen im Labormaßstab unter Standardtestbedingungen bis Ende 2014. 108

Abbildung 3-15: ASTM G173-03 Referenzspektrum inklusive der Darstellung des durch die Technologie der kristallinen Siliziumsolarzellen nutzbaren Anteils, der Transmissions- und Thermalisierungsverluste sowie der materialspezifischen Grenzwellenlänge. 109

Abbildung 3-16: Theoretische Wirkungsgradgrenzen verschiedener Halbleiter. 110

Abbildung 3-17: Übersicht der Mechanismen in der kristallinen Siliziumsolartechnologie, die eine Reduktion des Wirkungsgrades zeitigen. 111

Abbildung 3-18: Gegenüberstellung der Detailausschnitte des Aufbaus der Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1960er und der PERL-Zelle. 116

Abbildung 3-19: Gegenüberstellung des dreidimensionalen und des zweidimensionalen Detailausschnittes des Aufbaus einer HIT-Zelle. 117

Abbildung 3-20: Zweidimensionale Darstellung der Atomstruktur von einkristallinem Silizium und hydriertem amorphem Silizium mit Kennzeichnung einer Mikropore und SiH_2-Konfigurationen. 121

Abbildung 3-21: Zweidimensionaler Detailausschnitt des Aufbaus einer Standardeinschicht-a-Si:H-Zelle als pin-Struktur in Superstratekonfiguration. 125

Abbildung 3-22: Zweidimensionaler Detaillausschnitt einer Superstrate Tandemzelle. 129

Abbildung 3-23: Zweidimensionaler Detaillausschnitt einer a-Si:H / a-SiGe:H / a-SiGe:H Tripelzelle als Substratekonfiguration in nip-Struktur. 130

Abbildung 3-24: Externe Quanteneffizienz der Tripelzelle aus Abbildung 3-23 Die einzelnen Zellen sind für die jeweiligen Wellenlängen ausgelegt 131

Abbildung 3-25: Kristallisationsformen während des PECVD-Verfahrens in Abhängigkeit des Wasserstoffverdünnungsverhältnisses bei einem typischen Druck von 2 bis 3 mmHg und einer Plasmaanregungsfrequenz von 13,56 MHz. 132

Abbildung 3-26: Links: Zweidimensionaler Detaillausschnitt einer mirkomorphen Tandemzelle. **Rechts:** Abbildung mittels eines Mikroelektronenmikroskops 134

Abbildung 3-27: Zweidimensionaler Detaillausschnitt einer Cadmiumtellurid-Superstratzelle inklusive einer REM-Bruchkantenaufnahme der Schichtstruktur 136

Abbildung 3-28: Darstellung der Schnittstelle zwischen CdTe- und CdS-Schicht entlang der [1120]-Zonenachse mittels hochauflösender Transmissionselektronenmikroskopie. **Links:** mit Gitterfehlanpassungen. **Rechts:** ohne Gitterfehlanpassungen 138

Abbildung 3-29: Effizienzen von CdTe-Zellen mit verschiedenen Rückkontaktierungen direkt nach der Fertigung und infolge einer Erhitzung auf 200 °C. 139

Abbildung 3-30: Bandlücken verschiedener Legierungen der Chalkopyrite und zugehörige Gitterkonstante. 141

Abbildung 3-31: Zweidimensionaler Detaillausschnitt einer Standard-ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se_2-Zelle inklusive einer REM-Bruchkantenaufnahme der Schichtstruktur 142

Abbildung 3-32: Degradationsverhalten von Modulen der CIGS-Gruppe mit verschiedenen Verkapselungstechniken 145

Abbildung 4-1: Globale Neuinstallationen von 2000 bis 2013 in MW_p / **MO:** Mittlerer Osten. 157

Abbildung 4-2: Vergleich der Gesamtmarktanteile 2011 bis 2013 in %. 158

Abbildung 4-3: Globale kumulierte Kapazitäten von 2000 bis 2013 in MW_p / **MO:** Mittlerer Osten. 160

Abbildung 4-4: Chancen der Photovoltaik in den Staaten des Sonnengürtels. 162

Abbildung 4-5: Kumulierte und neuinstallierte Kapazitäten der EU-27-Staaten im Jahr 2012 in MW_p. **Orange Zahlen:** kumulierte Kapazitäten bis einschließlich 2012 / **blaue Zahlen:** Neuinstallationen 2012. 165

Abbildung 4-6: Deutschlandweite Neuinstallationen in MW_p von 1990 bis 1999 mit Standardabweichungen 169

Abbildung 4-7: Deutschlandweite Neuinstallationen in MW_p von 1990 bis 2013 mit relativen und absoluten Standardabweichungen und Detailausschnitt für die Jahre 1990 bis 1999. 173

Abbildung 4-8: Kumulierte Kapazitäten in Deutschland von 1990 bis 2013 in MW_p mit relativen und absoluten Standardabweichungen und Detailausschnitt für die Jahre 1990 bis 2001. 174

Abbildung 4-9: Bundeslandspezifische jährliche Neuinstallationen in MW der Jahre 2011 bis 2013....178

Abbildung 4-10: Prozentuale Anteile der bundeslandspezifischen jährlichen Neuinstallationen an den gesamtdeutschen jährlichen Neuinstallationen der Jahre 2011 bis 2013 in %. Werte berechnet aus Daten der Abbildung 4-9.....178

Abbildung 4-11: oben: Anteile der Bundesländer an national installierter Gesamtkapazität der Jahre 2001, 2008 und 2013. / **unten:** kumulierte Kapazitäten je Bundesland der Jahre 2001, 2008 und 2013. 180

Abbildung 4-12: Geographische Verteilung der infolge des 1.000-Dächer-Programmes installierten 150 sächsischen PV-Anlagen.....183

Abbildung 4-13: Darstellung der für die regionale Betrachtung relevanten Gebiete. 189

Abbildung 4-14: Technologieanteile von kristallinem Siliziumzellen und Dünnschichtzellen am Markt nach Jahren zwischen 1999 und 2012. 197

Abbildung 4-15: Nationaler jährlicher Kapazitätszubau gesamt und nach Technologieanteil in MW_p zwischen 1999 und 2012. 197

Abbildung 4-16: Analyse der Kosteneffizienz der verschiedenen Technologiepfade. **I**: kristallines Silizium / **II:** Dünnschichttechnologie ohne Stapelzellen / **III**: Neuer Konzepte inklusive Stapelzellen.....200

Abbildung 4-17: Marktanteile innerhalb der Klasse der kristallinen Siliziumtechnologie exklusive HIT-Zellentechnologie.....203

Abbildung 4-18: Jährlich neuinstallierte Kapazitäten reduziert auf die mono- und multikristalline Siliziumtechnologie für Deutschland und Sachsen samt deutschseitiger Anrainer (inklusive Berlin). / **a:** Schätzung des Marktanteils von bandgezogenem Silizium auf Basis der vorangegangenen Jahre zu 0,5 %.....204

Abbildung 4-19: Schematische Darstellung eines Solarmoduls mit 36 kristallinen Siliziumsolarzellen und einer partiellen Verschattung.....207

Abbildung 4-20: Querschnitt eines Glas-Folien-Moduls auf Basis kristalliner Siliziumsolarzellen. Abbildung nicht Maßstabsgetreu. 209

Abbildung 4-21: Teilverschattung eines Solarmoduls durch falsch ausgelegten Aluminiumrahmen. 210

Abbildung 4-22: Lichtbogenofen zur carbothermischen Reduktion von Siliziumdioxid zu elementarem Silizium. 216

Abbildung 4-23: Effizienz von Solarzellen in Abhängigkeit der Konzentration spezifischer Verunreinigungen. 218

Abbildung 4-24: Schema der Gewinnung von hochreinem Trichlorsilan mit zwei Rektifizier-Kolonnen bei 20 °C und 40 °C.....220

Abbildung 4-25: Siedediagramm der Chlorsilane und Erzeugung von hochreinem Trichlorsilan $SiHCl_3$ (TCS) mit zwei Rektifizier-Kolonnenbei 20 °C und 40 °C. **rot:** Output / **blau:** Input.....220

Abbildung 4-26: Schematischer Aufbau eines typischen Siemensreaktors.....221

Abbildung 4-27: Schematischer Aufbau eines typischen Wirbelschichtreaktors für die Herstellung von polykristallinen Siliziumgranulat. 224

Abbildung 4-28: Impfkristall im CZ-Verfahren und Auslaufen der Kristallstörungen infolge des dünnen Kristallhalses. 227

Abbildung 4-29: Herstellungsverfahren für monokristalline Siliziumstäbe. **links:** CZ-Verfahren / **rechts:** FZ-Verfahren. 229

Abbildung 4-30: Kokillengussverfahren zur Herstellung multikristalliner Ingots. **links:** Kokillengussverfahren / **rechts:** Struktur multikristalline Zufallsordnung und kolumnar erstarrte Ordnung. 230

Abbildung 4-31: Übersicht der verschiedenen Siliziumklassen nach Reinheit und Kristallqualität sowie der zugehörigen Produktionsrouten. 231

Abbildung 4-32: Grobe Einordnung der Herstellungskosten der verschiedenen Siliziumgüteklassen. 232

Abbildung 4-33: Gesamte Polysiliziumproduktion der Jahre 2007 und 2011 prozentual nach Technologie. 235

Abbildung 4-34: SGS-Herstellung ohne STC-Recycling. 236

Abbildung 4-35: SGS-Herstellung mit prozessinternem Recycling. 237

Abbildung 4-36: Betrachtungsrelevante Produktionsrouten für monokristallines und multikristallines SGS. 239

Abbildung 4-37: Kennzeichnung monokristalliner Ingots mittels Flats. 242

Abbildung 4-38: Pseudoquadratische Form monokristalliner Ingots mit Kennzeichnung der Nenngröße. 242

Abbildung 4-39: Prozessabfolge der Waferfertigung von der Ingotpräparation bis zum Rohwafer. 243

Abbildung 4-40: Schema der Wafervereinzelung mittels einer Multidrahtsäge. 245

Abbildung 4-41: Topologie der Schnittoberfläche eines unbehandelten Wafers. 248

Abbildung 4-42: Typische Sequenz der Herstellung einer Standardsiliziumsolarzelle aus einem kristallinen Siliziumrohwafer. 252

Abbildung 4-43: Prinzipskizze des Batchprozesses zur Emittererzeugung in einem p-dotierten kristallinen Siliziumwafer durch den Einsatz von $POCl_3$ im Innenraum eines horizontalen Quarzrohrofens. 255

Abbildung 4-44: Schema der Erzeugung eines selektiven Emitters durch Siebdruck einer phosphorhaltigen Paste und unterschiedlicher Diffusionsraten aus der Paste und der Gasphase. 256

Abbildung 4-45: Schritte des Siebdruckverfahrens zur Erzeugung der Front- und Rückkontakte einer Standardsiliziumsolarzelle. 260

Abbildung 4-46: Beispielhafte Rückansicht einer monokristallinen Siliziumsolarzelle nach dem Siebdruck der Rückkontakte. 262

Abbildung 4-47: Beispielhafte Frontkontaktarchitektur nach dem Siebdruckverfahren mit Detailausschnitt der Sammelschienen und der Kontaktfinger. 263

Abbildung 4-48: Produktionssequenz Standardmodul aus kristallinen Siliziumsolarzellen. 273

Abbildung 4-49: Grundprinzip der Verschaltung von 28 Solarzellen zu 2 Teilstrings mit 2 Bypassdioden. 275

Abbildung 4-50: Stoffspezifische Massenanteile in einem $gSSM_{sc/mc}$ unterteilt in Inhaltsstoffe mit einem Anteil von mehr als 1 Massen-% und von weniger als 1 Massen-%. 294

Abbildung 4-51: Lokalisierung der führenden nationalen PV-Produzenten der Siliziumsurrogate nach Tabelle 4-32. 314

Abbildung 5-1: Symbol zur Kennzeichnung von Elektro- und Elektronikgeräten nach Anhang IX der RL 2012/19/EU. 346

Abbildung 5-2: Bräunliche Verfärbung von Zellenrändern infolge unsauberer Produktionsschritte. 382

Abbildung 5-3: Druck auf die überstehende Kante des Aluminiumrahmens durch Schneelast in Abhängigkeit des Installationswinkels α_i. 384

Abbildung 5-4: Prozentuale Verteilung der spezifischen Defektarten, die einen Modulaustausch im Zeitraum bis zwei Jahre nach der Anlageninstallation zeitigen. 392

Abbildung 5-5: Prozentuale Verteilung der spezifischen Defektarten, die einen Modulaustausch im Zeitraum zwischen zwei und zehn Jahren nach der Anlageninstallation zeitigen. 393

Abbildung 5-6: Prozentuale Verteilung der spezifischen Defektarten, die einen Modulaustausch nach bis zu 4,9 Jahren nach der Anlageninstallation zeitigen. 394

Abbildung 5-7: Defekte an 272 Photovoltaikmodulen nach über 15 Jahren Betriebszeit. 395

Abbildung 5-8: Jährliche Durchfallquoten kristalliner Siliziumsolarmodule durch die Prüfsequenz nach IEC 61215 für die Jahre 2007 bis 2013. 397

Abbildung 5-9: Absterbekurven (Weibullverteilungen) nach Formel 5-1 für kristalline Siliziumsolarmodule unterteilt in die Installationszeiträume bis Ende 2012 und ab 2013 inklusive der zugrunde liegenden Form- und Lageparameter sowie der sich jeweils ergebenden annuellen Absterbewahrscheinlichkeiten. 410

Abbildung 5-10: Jährliche Defekt- beziehungsweise Ausfallraten kristalliner Siliziumsolarmodule nach den einzelnen Lebensabschnitten beginnend mit dem Transport und der Anlageninstallation bis hin zum Erreichen des technischen Lebensendes für Module, die bis Ende 2012 installiert wurden. 413

Abbildung 5-11: Korrigierte jährliche Abfallraten kristalliner Siliziumsolarmodule über die gesamte Nutzungsdauer (inklusive Transport- und Installationsschäden) getrennt für installierte Module bis Ende 2012 und ab 2013. 414

Abbildung 5-12: Korrigierte Absterbekurven über die gesamte Nutzungsdauer kristalliner Siliziumsolarmodule beginnend mit dem Transport der Module und der Anlageninstallation bis zum Erreichen des technischen Lebensendes für Installationen bis Ende 2012 und ab 2013. 416

Abbildung 5-13: Technologiebereinigte jährliche Neuinstallationen und Schatteninstallationen von 1990 bis 2070. 419

Abbildung 5-14: Prognose absoluter Abfallströme aus Altmodulen für Deutschland. 422

Abbildung 5-15: Gegenüberstellung des berechneten Abfallstroms; des Anteils an Transportschäden, Installationsschäden und der Kinderkrankheiten; sowie der jährlichen Neuinstallationen für Deutschland zwischen 2000 und 2015. 426

Abbildung 5-16: Auswirkung der annuellen Neuinstallationen (inklusive Schatteninstallationen) in Form jährlich anfallender Altmodule in Deutschland als Farbcodierung der Einzelbeiträge. 428

Abbildung 5-17: Darstellung der für Deutschland initial berechneten Prognose absoluter annueller Altmodulströme zusammen mit zwei Prognosevariationen infolge der Parametermodifikation und den daraus resultierenden Konfidenzintervallen für den langfristigen Planungshorizont ab dem Jahr 2028. 441

Abbildung 5-18: Prognose jährlicher Altmodulströme für die drei Beispielregionen Sachsen samt deutschseitiger Anrainer; ostdeutsches PV-Produktionscluster sowie den Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen. 449

Abbildung 5-19: Prognose jährlicher Altmodulströme für die Bundesländer Sachsen und Thüringen. 451

Abbildung 5-20: Grobschema des Recyclingverfahrens der SolarWorld AG. 465

Abbildung 5-21: Grobschema des Recyclingverfahrens der LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG. 476

Abbildung 5-22: Grobschema des Recyclingverfahrens der Accurec Recycling GmbH. 479

Abbildung 5-23: Marktpreis multikristalline Siliziumsolarrohwafer zwischen 01.05.2013 und 28.12.2016. 518

Abbildung 5-24: Marktpreis polykristallines SGS zwischen 01.01.2014 und 01.12.2016. 521

Abbildung 5-25: Darstellung der kalkulierten Wertepaare von aktivitätsspezifischen Verfahrenskosten in [€/a] und zugehörigem Arbeitspunkt in [t/a] sowie der beiden ermittelten Näherungsfunktionen. 531

Abbildung 5-26: Darstellung der kalkulierten Wertepaare von aktivitätsspezifischen Verfahrenskosten als Stückkosten in [€/t] und dem zugehörigen Arbeitspunkt in [t/a] sowie der beiden angepassten Näherungsfunktionen. 532

Abbildung 5-27: In den aufgeführten Quellen angegebene Schätzungen zu Mindestkapazitäten für einen rentablen Betrieb eines Recyclingverfahrens für kristalline Siliziumsolaraltmodule. 533

Abbildung 5-28: Kartographische Darstellung der betrachtungsrelevanten Region des ostdeutschen PV-Produktionsclusters samt Autobahn- und Bundesstraßennetz und Lokalisierung der potenziellen Recyclingstandorte der Knotenmenge r. 541

Abbildung 5-29: Summe der knotenspezifisch benötigten Transportleistungen in Tonnenkilometern und Kennzeichnung der optimalen Standorte für die definierten Rahmenbedingungen. 543

Abbildung 5-30: Gegenüberstellung der knotenspezifisch benötigten Gesamttransportleistungen in Tonnenkilometern für die Ausgangssituation und beide Modifikationen. 545

Abbildung 5-31: Abhängigkeit der tatsächlich zurückzulegenden Gesamtstrecke in Kilometern von der Ausgestaltung des Fuhrparks in Form der Wahl der zulässigen Nutzlast der Transportfahrzeuge. 546

Abbildung 5-32: Exemplarische Kosten der Beschaffungslogistik bei Auslagerung für eine Bandbreite an Frachtkosten zwischen 2,00 und 2,50 € je Fahrzeugkilometer für die definierten Rahmenbedingungen. 550

Abbildung 5-33: Graphische Darstellung der Verfahrenskosten als abhängige Variable vom Funktionsargument der erzielbaren Erlöse auf Basis der Gewinnschwellenermittlung. 570

Abbildung 5-34: Graphische Darstellung der Verfahrenskosten als abhängige Variable vom Funktionsargument der Kostenrubrik Sammel- und Transportkosten auf Basis der Gewinnschwellenermittlung. 572

Abbildung 5-35: Darstellung der Gewinnschwelle für die statische Problemstellung mit Kennzeichnung der Ausgangslage und der Variation einzelner Parameter in Anlehnung an Abbildung 5-34. 576

Abbildung 5-36: Maximale allgemeine Transportkosten in Abhängigkeit der annuellen Bezugsmenge kristalliner Siliziumsolaraltmodule zur Erreichung des Break-even nach Formel 5-13. 580

Abbildung 5-37: Graphische Darstellung der von der Bezugsmenge x abhängigen Sammel- und Transportkostenfunktionen für die definierten Rahmenbedingungen und einen Fuhrpark mit Fahrzeugen von 5,5 Tonnen sowie 28 Tonnen zulässiger Nutzlast. 587

Abbildung 5-38: Darstellung der Einzelterme der Formel 5-16 im kartesischen Koordinatensystem inklusiver der Gesamtkostenkurve für die definierten Systemgrenzen. 589

Abbildung 5-39: Detailausschnitt Abbildung 5-38 für $0 \leq x \leq 1.000$ Tonnen je Jahr. 590

Abbildung 5-40: Gewinn und Verlust in Abhängigkeit der Bezugsmenge x nach Formel 5-17. 591

Abbildung 5-41: Kapitalwert in Abhängigkeit der Laufzeit bei einem Kalkulationszinssatz von $r_K = 3$ % und variierender Investitionssumme dargestellt mittels Interpolation der Werte aus Tabelle 5-26. 598

Abbildung 5-42: Break-even der Kapitalwerte nach Laufzeit der Investition für verschiedene Kalkulationszinssätze in Abhängigkeit der Investitionshöhe. 600

Abbildung 5-43: Break-even der Kapitalwerte aller drei Szenarien in Abhängigkeit der initialen Investitionssumme und des Kalkulationszinssatzes. 603

Abbildung 5-44: Konsolidierung der Haupttransportströme über Zwischenlager. 637

Abbildung 5-45: Konsolidierung der Transportleistung und Verteilung der regionalen Altmodulaufkommen mittels eines Zentrallagers oder zentralen Sortierbetriebes. 638

Abbildung 5-46: Konsolidierung der Transportleistung und Verteilung der regionalen Altmodulaufkommen über Nabe-Speiche Netzwerke. 638

ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

Die nachstehenden drei Abkürzungen sind gesondert aufgeführt, da sie die zentralen Begrifflichkeiten der vorliegenden Arbeit darstellen.

gSSM	geprüftes kristallines Standardsiliziumsolarmodul, produziert nach der im Anhang 4-11 definierten Fertigungssequenz
$gSSM_{alt}$	geprüftes kristallines Standardsiliziumsolarmodul, produziert nach der im Anhang 4-11 definierten Fertigungssequenz, dem die Abfalleigenschaft obliegt
PV	Photovoltaik

Allgemeine Kürzel

AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Japan)
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNL	Brookhaven National Laboratory
BSW	Bundesverband Solarwirtschaft e.V.
CABRISS-Projekt	Implementation of a CirculAr economy Based on Recycled, reused and recovered Indium, Silicon and Silver materials for photovoltaic and other applications - Projekt
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (Französisches Kommissariat für Atomenergie und alternative Energien)
CSR	Corporate Social Responsibility
Cu-PV-Projekt	Cradle-to-Cradle sustainable PV modules Projekt
Czech RE Agency	Tschechische Agentur für erneuerbare Energien
DGS	Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
EU	Europäische Union
Fraunhofer ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

Fraunhofer THM	Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien
FRELP-Projekt	Full Recovery End-of-Life Photovoltaic Projekt
HHI	Herfindahl-Hirschman-Index
IDW	Institut der Wirtschaftsprüfer
IEA PVPS	International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme
IEA	International Energy Agency
IMEC	Interuniversity Microelectronics Centre
ITRI	Industrial Technology Research Institute (taiwanesische Non-Profit Forschungseinrichtung)
Kap.	Kapazität
KfW	Deutsche Kreditanstalt für Wiederaufbau
kum.	kumuliert
LCD	Flüssigkristallanzeige
LKW	Lastkraftwagen
MO	Mittlerer Osten
örE	öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger
ProgRess	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
PV MOREDE	Photovoltaic Panels Mobile recycling Device
RCA	Radio Corporation of America
SSV	Stazione Sperimentale del Vetro
stiftung ear	stiftung elektro-altgeräte register
TU	Technische Universität
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UNSW	University of New South Wales
WGI	Worldwide Governance Indicators
ZKS-Abfall	Zentrale Koordinierungsstelle Abfall
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung

Technischer oder physikalischer Charakter

Physikalische / technische Grundlagen

AM	Air Mass
AM0	extraterrestrisches Strahlungsspektrum
AM1	senkrechte Einstrahlung kürzester Weg der Strahlung durch Erdatmosphäre
AM1,5	durchschnittliches Jahresspektrum bei 45° nördlicher Breite
AM2	doppelter Weg der Strahlung durch die Erdatmosphäre
ASTM G173-03	American Society for Testing and Materials Terrestrial Reference Spectra for Photovoltaic Performance Evaluation
BOS	Balance of System
DHT	Damp Heat Test (englisch für Feuchte-Hitze-Test)
LID	Lichtinduzierte Degradation
PID	Potenzialinduzierte Degradation
RLZ	Raumladungszone
STC	Standard Test Conditions
SWE	Staebler-Wronski-Effekt
TPO	thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis
TPS	thermoplastische Stärke
UV	ultraviolette Strahlung

Zellen- und Modultechnologie

a-Si	amorphes Silizium
a-Si:H	hydriertes amorphes Silizium
a-SiC:H	mit Kohlenstoff versetztes hydriertes amorphes Silizium
a-SiGe:H	mit Germanium versetztes hydriertes amorphes Silizium
a-SiN:H	mit Stickstoff versetztes hydriertes amorphes Silizium
a-SiO:H	mit Sauerstoff versetztes hydriertes amorphes Silizium
BCC	Buried-Contact-Cell
BPD	Bypassdiode
BSF	Back-Surface-Field
CIGS	Technologie der Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-Solarmodule
CIS	Technologie der Kupfer-Indium-Diselenid-Solarmodule
c-Si	kristallines Silizium

EGS	electronic grade Silicon
EWT	Emitter Wrap Through
FSF	Front-Surface-Field
HIT-Zelle	Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer Zelle
IBC-Zelle	Interdigitated Back Contact Zelle
INSECT	Inline Selective Emitter Concept
LBSF	local back surface field
LGBC-Zelle	Laser Grooved Buried Contact Zelle
MGS	metallurgisches Silizium
MINP-Zelle	metal-insulator-NP junction-Zelle
MWA	Emitter Wrap Around
MWT	Metallisation Wrap Through
n-Schicht	n-dotierte Schicht negativ dotierte Schicht
p-Schicht	p-dotierte Schicht positiv dotierte Schicht
PERL-Zelle	passivated emitter, rear locally-diffused-Zelle
SGS	solar grade Silicon
TCO	Transparent Conducting Oxide (transparente Elektrode aus leitendem Oxid)
UMG	upgraded metallurgical grade Silicon
µc-Si	mikrokristallines Silizium
µc-Si:H	hydriertes mikrokristallines Silizium

Verfahrenstechnischer Bezug

CZ-Verfahren	Czochralskiverfahren
FBR	Wirbelschichtreaktor
FZ-Verfahren	Zonenziehverfahren (engl: Floating Zone)
HDR	hochdisperse Kieselsäure
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition (chemische Gasphasenabscheidung unter Niederdruck)
PECVD	plasma-enhanced chemical vapour deposition (plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung)
PSG	Phosphorsilikatglas
SC-1 / SC-2	Standard Clean 1 / Standard Clean 2 (Reinigungsschritte)
VHF	very high frequency plasma deposition

Ökonomisch / wirtschaftliche Betrachtungen

CLP	Covering-Location Problem
EIM	stufenspezifischer Einzelinhaltsstoffmultiplikator
EPM	stufenspezifischer Einzelproduktionsmultiplikator
FTL	Full Truck Load
kIM	stufenspezifischer kumulierter Inhaltsstoffmultiplikator
Knotenmenge b	Gesamtheit der Altmodulbezugsknoten (Übergabestellen)
Knotenmenge q	Gesamtheit der betrachtungsrelevanten Modulproduzentenstandorte
Knotenmenge r	Gesamtheit der potenziellen Recyclingstandorte
kPM	stufenspezifischer kumulierter Produktionsmultiplikator
KW	Kapitalwert
M1, …, M13	Standorte Modulproduzenten
MCLP	Maximal-Covering-Location Problem
NPV	Net Present Value
R1, …, R21	potenzielle Standorte einer Recyclingaktivität
TSP	Traveling Salesman Problem (Problem des Handlungsreisenden)

Ökologischer Bezug

ADF	Abiotic Depletion Factor (Erschöpfung abiotischer Ressourcen)
AP	Acidification Potential (Versauerungspotenzial)
CML	Centrum voor Milieukunde der Universität Leiden
ECA	Ecological Classification Factor for Aquatic Ecosystems (aquatische Ökotoxizität)
ECT	Ecological Classification Factor for Terrestrial Ecosystems (terrestrische Ökotoxizität)
EMAS	Eco- Management and Audit Scheme
EPS	Environmental priority strategy
GWP	Global warming potential (Treibhausgaspotenzial)
HC	Human Toxicological Classification Factor (Humantoxizität)
KEA	kumulierter Energieaufwand
MIPS	Material-Inputs pro Serviceeinheit
NP	Nutrification Potential (Eutrophierungspotenzial)

ODP	Ozon Depletion Potential (stratosphärisches Ozonabbaupotenzial)
SE	Schadschöpfungseinheiten
SPI	Sustainable Process Index
UBP	Umweltbelastungspunkte

Rechtliche Aspekte

AEUV	Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union
BefErlV	Beförderungserlaubnisverordnung
EEA	Elektro- und Elektronik-Altgeräte
EEG	Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (kurz: Erneuerbare-Energien-Gesetz)
ElektroGGebV	Elektro- und Elektronikgerätegesetz-Gebührenverordnung
EN	Europäische Norm
GHS	Global harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien
H-Sätze	Gefahrenhinweise im Rahmen des global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien
IEC	Norm der “International Electrotechnical Commission”
IP-Zertifizierung	Zertifizierung nach den „International Protection Codes“
NREAP	National Renewable Energy Action Plan
P-Sätze	Sicherheitshinweise im Rahmen des global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien
REACH	Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe

Betrachtete Verordnungen und Gesetze

AbfAEV - Verordnung über das Anzeige- und Erlaubnisverfahren für Sammler, Beförderer, Händler und Makler von Abfällen vom 05. Dezember 2013

AbfVerbrG - Gesetz zur Ausführung der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Juni 2006 über die Verbringung von Abfällen 1) und des Basler Übereinkommens vom 22. März 1989 über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung 2)

BruchgV - Verordnung (EU) Nr. 1179/2012 der Kommission vom 10. Dezember 2012 mit Kriterien zur Festlegung, wann bestimmte Arten von Bruchglas gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates nicht mehr als Abfall anzusehen sind

ElektroG2 - Gesetz zur Neuordnung des Rechts über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG) vom 20. Oktober 2015

ElektroStoffV - Verordnung zur Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten vom 19. April 2013

KrWG - Gesetz zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts vom 24. Februar 2012

NachwV - Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen vom 20. Oktober 2006

REACH - Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission

Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien

Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt

RoHS2 - Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (Neufassung)

Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

VVA - Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Juni 2006 über die Verbringung von Abfällen

WEEE2 - Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik Altgeräte (Neufassung)

Symbolverzeichnis, Indizes, Konstanten und genutzte Einheiten

Physikalische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Definition	primär verw. Einheiten
A	Fläche / Querschnitt	m², km²
a	Ganzzahlige Laufvariable	-
c	Lichtgeschwindigkeit im stofflichen Medium	m/s
D	Diffusionskoeffizient	cm²/s, m²/s
d	Schichtdicke	nm, µm
$\mathbf{d_{AR}}$	Schichtdicke Antireflexionsschicht	nm
$\mathbf{dc_i/dx}$	Konzentrationsgradient	mol/m^4
$\mathbf{E_A}$	Akzeptorenniveau	eV
$\mathbf{E_D}$	Donatorniveau	eV
$\mathbf{E_F}$	Elektrische Feldstärke	V/cm, V/m
$\mathbf{E_L}$	Energieniveau untere Leitungsbandkante	eV
$\mathbf{E_{PH}}$	Energie eines Photons	eV
$\mathbf{E_V}$	Energieniveau obere Valenzbandkante	eV
$\mathbf{E_1, \ldots, E_n}$	Energetische Zustände	eV
$\Delta\mathbf{E_G}$	Energiedifferenz zwischen Leitungs- und Valenzband	eV
f	Frequenz	Hz
$\mathbf{F_{Dot}}$	Dotierkonzentration	Anzahl/Anzahl
$\overrightarrow{\mathbf{F_G}}$	Gewichtskraft	N
$\overrightarrow{\mathbf{F_H}}$	Hangabtriebskraft	N
$\overrightarrow{\mathbf{F_N}}$	Normalkraft	N
g	Reelle Laufvariable	-
I	Strahlungsintensität	W/m²
j	Diffusionsstromdichte	$m^{-2}s^{-1}$
$\mathbf{j_F}$	Feldstromdichte	A/m²
L	Diffusionslänge	µm
l	Länge / Ausdehnung	mm, cm, m, km
M	Molare Masse	g/mol
m	Masse	µg, g, kg, t
$\mathbf{m_{Bor}}$	Benötigte Masse Bor für die Dotierung	mg
$\mathbf{m_{Dot}}$	Zu dotierende Masse	kg

Symbol	Definition	primär verw. Einheiten
N	Anzahl freie Elektronen	Anzahl
n	Dichte Elektronen	cm^{-3}
$\dot{N}$	Stoffstrom	kmol/s
N_A	Dichte Akzeptoratome	cm^{-3}
n_A	Anzahl Atome	Anzahl
N_B	Anzahl Boratome	Anzahl
N_C	Zustandsdichte Leitungsband	cm^{-3}
N_D	Dichte Donatoratome	cm^{-3}
n_i	Intrinsische Leitfähigkeit	cm^{-3}
N_{Si}	Anzahl Siliziumatome je Kubikzentimeter	Anzahl/cm^3
$N_{Si,Dot}$	Anzahl Siliziumatome der zu dotierenden Masse	Anzahl
N_V	Zustandsdichte Valenzband	cm^{-3}
n_0	Brechungsindex Luft	-
n_1	Brechungsindex Antireflexionsschicht	-
n_2	Brechungsindex Halbleitermaterial	-
p	Dichte Defektelektronen	cm^{-3}
p_L	Luftdruck	mbar
P_S	Abgestrahlte Leistung der Sonne	W
Δp	Impuls	(kg·m)/s
q	Elementarladung	C
R	Reflexionsrate, reflektierter Anteil der Strahlung	%
r	Radius	km
R_H	Wasserstoffverdünnungsverhältnis	-
T	Temperatur	K oder °C
t	Zeit / Zeitpunkt / Zeitspanne / Betriebszeit	µs, s, a
U	Spannung	V
U_D	Diffusionsspannung	V
V	Volumen	m^3, cm^3
v_L	Leitungsgeschwindigkeit	cm/s
$v_{Mittel,E}$	Mittlere Bahngeschwindigkeit der Erde	km/s
w	für photovoltaischen Effekt nutzbare Fläche	mm
W_A	Austrittsarbeit	eV
W_{RLZ}	Gesamtausdehnung Raumladungszone	µm
Δw	Nicht für photovoltaischen Effekt nutzbare Fläche	mm
x	Allgemeine Variable	-

Symbol	Definition	primär verw. Einheit
α	Winkel (Einfallswinkel)	°
α_{Abs}	Stoffspezifischer Absorptionskoeffizient	cm^{-1}
α_i	Installationswinkel	°
β	Winkel (Ausfalsswinkel)	°
η_{ext}	Externer Quantenwirkungsgrad	Anzahl/Anzahl
λ	Wellenlänge	nm, µm
λ_G	Materialspezifische Grenzwellenlänge	µm
μ	Beweglichkeit Ladungsträger	$cm^2/(V \cdot s)$
ρ	Dichte	g/cm^3
ρ_B	Dichte Bor	g/cm^3
ρ_{Si}	Dichte Silizium	g/cm^3
σ	Leitfähigkeit	$\Omega^{-}1 \cdot cm^{-}1$, $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
τ	Ladungsträgerlebensdauer	µs
φ	Sonnenhöhenwinkel	°

Symbole und Formelzeichen mit ökonomischen Bezug

Symbol	Definition	primär verw. Einheit
a	Ganzzahlige Laufvariable	-
b	Formparameter Weibullverteilung allgemein	-
b_1	Formparameter der Weibullverteilung von Modulen, die vor 2013 installiert wurden	-
b_2	Formparameter der Weibullverteilung von Modulen, die ab 2013 installiert wurden und werden	-
f	Stufenindikator	-
F_a	Abwertungsfaktor der Bezugsmenge	-
g	Reelle Laufvariable	-
I_i	Vermarktungsfähige Outputfraktionen aus dem Recycling	-
I_0	Initiale Investitionssumme	€
GV	annueller Gewinn oder Verlust	€

Symbol	Definition	primär verw. Einheit
$\mathbf{K_{g,m}}$	Analagenkapazität, die beim ausgewiesenen Altmodulaufkommen im geschlossenen Definitionsbereich (Maximalbereich) gesichert ausgelastet werden kann	t/a
$\mathbf{K_r}$	Altmodulaufkommen als Reserve zum risikofreien oder gesicherten Wert	t/a
$\mathbf{K_{rf}}$	Analagenkapazität, die beim ausgewiesenen Altmodulaufkommen risikofrei ausgelastet werden kann	t/a
$\mathbf{K_{rf,m}}$	Analagenkapazität, die beim ausgewiesenen Altmodulaufkommen im geschlossenen Definitionsbereich (Maximalbereich) risikofrei ausgelastet werden kann	t/a
$\mathbf{K_{80}}$	Altmodulaufkommen zur kurzfristigen Auslastung von 80 % der aktivitätsspezifischen vorgehaltenen Recyclingkapazitäten	t/a
KW	Kapitalwert	€
ME	Stoffspezifische Materialeffizienz	%
MV	Stoffspezifischer Materialverlust	%
$\mathbf{N_{Tr}}$	Nutzlast Transportfahrzeug	t
$\mathbf{P_i}$	Marktpreise der vermarktungsfähigen Outputfraktionen aus dem Recycling	€/Einheit
$\mathbf{P_1, \ldots, P_n}$	Punkte im kartesischen Koordinatensystem / Arbeitspunkt einer potenziellen Recyclingaktivität	-
$\mathbf{r_K}$	Kalkulationszinssatz	%
$\mathbf{S_E}$	Sicherheitsfaktor	-
SE	Stufeneffizienz	%
SK	gesamte Kosten aus der Rubrik der sonstigen Kosten	€
Sk	Stückkosten der Rubrik der sonstigen Kosten	€/Stk
SSF	Stoffspezifischer Stufenfaktor	-
SV	Stuvenverlust	%
$\mathbf{S_1, \ldots, S_n}$	Schnittpunkte / Funktionsargumente	-
t	Zeit / Zeitpunkt / Zeitspanne / Betriebszeit	s, h, a
$\mathbf{T_f}$	Festgelegte Zeitspanne	a
$\mathbf{t_i}$	Bezugsjahr als Differenz aus Installationszeitpunkt und Betriebsjahr	a
$\mathbf{T_L}$	Lageparameter Weibullverteilung allgemein	-

Symbol	Definition	primär verw. Einheit
t_{Start}	Startjahr als Bezugszeitpunkt	-
t_V	verschobene Lebensdauer	a
T_1	Lageparameter der Weibullverteilung von Modulen, die vor 2013 installiert wurden	-
T_2	Lageparameter der Weibullverteilung von Modulen, die ab 2013 installiert wurden und werden	-
TK	gesamte Kosten aus der Rubrik der Sammel- und Transportkosten	€
Tk	Stückkosten der Rubrik der Sammel- und Transportkosten	€
TK_G	Sammel- und Transportgrenzkosten zur Erreichung der Gewinnschwelle bei geringem Erlösniveau	€
$TK_{G,i}$	Maximale Sammel- und Transportkosten zur Erreichung der Gewinnschwelle bei geringem Erlösniveau und veränderten Verfahrenskosten	€
TK_M	Maximale Sammel- und Transportkosten zur Erreichung der Gewinnschwelle bei gegebenen Rahmenbedingungen	€
VK	gesamte Kosten aus der Rubrik der Verfahrenskosten	€
Vk	Stückkosten der Rubrik der Verfahrenskosten	€/Stk
VK_G	Grenzverfahrenskosten zur Erreichung der Gewinnschwelle bei geringem Erlösniveau	€
$VK_{G,i}$	Maximale Verfahrenskosten zur Erreichung der Gewinnschwelle bei geringem Erlösniveau und veränderten Sammel- und Transportkosten	€
$VK_{S4,i}$	Grenzverfahrenskosten zur Erreichung der Gewinnschwelle bei gegebenen Argument S_4 und festgelegten Sammel- und Transportkosten	€
$W_1, \ldots, W_n$	Wertepaare aus verfügbarem Altmodulstrom und Sammel-und Transportkosten	-
x	Anzahl recycelter Altmodule / Bezugsmenge	Anzahl, Stk

Allgemeine Indizes

Tiefgestellt

E	Erde
f	Stufenindikator
fix	fix (fixe Kosten)
fl	flüssig
G	Gesamt
gas	gasförmig
i	Laufvariable
M	Maximum / maximal
mc	multikristallin
Mittel	Durchschnitt
mod	modifiziert
N	Normal / Normalsituation
n	Elektron
O	Oberfläche
opt	optimal
p	polykristallin
R	Rein
r	Reserve
RLZ	Raumladungszone
S	Sonne
sc	monokristallin
SGS	solar grade silicon
t	Bezugszeitpunkt
u	Defektelektron
v	variabel
VN	Verwendung (verfahrenstechnischer Ansatz des Recyclings)
VR	Verwertung (verfahrenstechnischer Ansatz des Recyclings)
Wafer	Wafer
0	Start / Initiierung
2013 oder sonstige Jahreszahlen	Bezugsjahr

Hochgestellt

[M1], …, [Mn]	Kennzeichnungslogik identifizierter Mängel aus der Literatur mit Bezug zum nachfolgenden Text

Konstanten

AE	Astronomische Einheit: 149.597.870.700 m
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum: $2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s
e	Eulersche Zahl: 2,71828182846
E_S	Solarkonstante: 1367,17 W/m²
h	Planck'sches Wirkungsquantum: $6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J·s
k	Boltzmannkonstante: 8,617 eV/K
N_{Av}	Avogadrokonstante: $6{,}022136 \cdot 10^{23}$ mol^{-1}
q	Elementarladung: $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C

Standardmäßig verwendete Einheiten

LE – Längeneinheiten

nm	Nanometer:	**10^{-9} m**
µm	Mikrometer:	**10^{-6} m**
mm	Millimeter:	**10^{-3} m**
m	Meter:	**10^0 m** (Basis)
km	Kilometer:	**10^3 m**

FE – Flächeneinheiten

nm²	Quadratnanometer:	**10^{-18} m²**
µm²	Quadratmikrometer:	**10^{-12} m²**
mm²	Quadratmillimeter:	**10^{-6} m²**
m²	Quadratmeter:	**10^0 m²** (Basis)
km²	Quadratkilometer:	**10^6 m²**

VE – Volumeneinheiten

nm³	Nanometer:	**10^{-27} m³**
µm³	Mikrometer:	**10^{-18} m³**
mm³	Millimeter:	**10^{-9} m³**
m³	Meter:	**10^0 m³** (Basis)
km³	Kilometer:	**10^9 m³**

GE – Gewichtseinheiten

ng	**N**anogramm:	**10^{-9} g**
µg	Mikrogramm:	**10^{-6} g**
mg	Milligramm:	**10^{-3} g**
g	Gramm:	**10^0 g** (Basis)
kg	Kilogramm:	**10^3 g**
t	Tonne:	**10^6 g**

ZE – Zeiteinheiten

ns	Nanosekunden:	**10^{-9} s**
µs	Mikrosekunden:	**10^{-6} s**
ms	Millisekunden:	**10^{-3} s**
s	Sekunden:	**10^{0} s** (Basis)
min	Minuten:	**$6 \cdot 10^{1}$ s** (60 s)
h	Stunden:	**$6^{2} \cdot 10^{2}$ s** (3.600 s)
d	Tage	**$4 \cdot 6^{3} \cdot 10^{2}$ s** (86.400 s)
a	Jahre	**$146 \cdot 6^{3} \cdot 10^{3}$ s** ($31.536 \cdot 10^{3}$ s)

PE – Prozenteinheiten

%	Prozent
Gew.-%	Gewichtsprozent
Ma-%	Massenprozent
Vol-%	Volumenprozent

ME – Mengeneinheiten

Anzahl	Gesamtzahl, Menge, Quantität eines Betrachtungsgegenstandes
Stk	Stückzahl, abgezählte Menge
mol	Stoffmenge, Teilchenäquivalente

EE – Elektrische Einheiten

A	Ampere	
C	Coulomb	**[A·s]**
eV	Elektronenvolt	**$[kg \cdot m^{2} \cdot s^{-2}]$**
Hz	Hertz	**[1/s]**
J	Joule	**$[kg \cdot m^{2} \cdot s^{-2}]$**
S	Siemens	**$[A^{2} \cdot s^{3} \cdot kg^{-1} \cdot m^{-2}]$**
V	Volt	**$[kg \cdot m^{2} \cdot A^{-1} \cdot s^{-3}]$**
W	Watt	**$[kg \cdot m^{2} \cdot s^{-3}]$**
Wh	Wattstunde	**$[3600 \cdot kg \cdot m^{2} \cdot s^{-2}]$**
W_p	Watt peak	**$[kg \cdot m^{2} \cdot s^{-3}]$**
Ω	Ohm	**$[kg \cdot m^{2} \cdot A^{-2} \cdot s^{-3}]$**

WE – Währungseinheiten

DM	Deutsche Mark
$	Amerikanische Dollar
€	Euro

SE – Sonstige Einheiten

bar	Bar (Druck)
K	Kelvin
N	Newton
°C	Grad Celcius
°	Grad (Winkelmaß)

Verzeichnis der chemischen Elemente und Verbindungen

Ag - Co

Ag	Silber
$AgNO_3$	Silbernitrat
Al	Aluminium
$AlCl_3$	Aluminiumchlorid
AlMg3	Aluminium-Magnesium-Legierung mit 3 % Magnesiumanteil
As	Arsen
AsH_3	Arsin
Au	Gold
B	Bor
B_2H_6	Diboran
BCl_3	Bortrichlorid
Br	Brom
C	Kohlenstoff
$C_2H_4O_2$	Essigsäure
C_3H_8O	Isopropanol
$C_7H_{16}O_3$	Dipropylenglycolmethyl-ether (**DPM**)
Ca	Kalzium
$CaCl_2$	Kalziumchlorid
$CaTiO_3$	Kalziumtitanat
Cd	Cadmium
$CdCl_2$	Cadmiumchlorid
CdS	Cadmiumsulfid
CdSe	Cadmiumselenid
CdTe	Cadmiumtellurid
CF_4	Tetrafluormethan
CH_4	Methan
CH_4O_3S	Methansulfonsäure
Cl	Chlor
Co	Cobalt

CO - I

CO	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cd_2SnO_4	Cadmiumzinnoxid (**CTO**)
Cu	Kupfer
$CuAlS_2$	Kupferaluminiumdislufid
$CuAlSe_2$	Kupferaluminium-diselenid
$CuFeS_2$	Kupferkies
$CuGaSe_2$	Kupfergaliumdiselenid
$CuInS_2$	Roquesit
$CuInSe_2$	Kupferindiumdiselenid
EVA	Ethylenvinylacetat
F	Fluor
Fe	Eisen
$FeCl_2$	Eisen(II)-chlorid
Ga	Gallium
GaAs	Galliumarsenid
GaP	Galliumphosphid
Ge	Germanium
H_2	molekularer Wasserstoff
H_2O	Wasser
H_2O_2	Wasserstoffperoxid
H_3PO_4	Phosphorsäure
HCl	Salzsäure
HF	Flusssäure / Fluorwasserstoff
HgCdTe	Quecksilber-Cadmium-Tellurid
HNO_3	Salpetersäure
I	Iod

In - Sb

In	Indium
In_2S_3	Indiumsulfid
InAs	Indiumarsenid
InP	Indiumphosphid
InSb	Indiumantimonid
ITO	Indium-Zinn-Oxid
KOH	Kaliumhydroxid
Li	Lithium
MgF_2	Magnesiumfluorid
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
$MoSe_2$	Molybdändiselenid
N_2	molekularer Stickstoff
N_2O	Distickstoffmonoxid
Na	Natrium
Na_2S	Natriumsulfid
Na_2Se	Natriumselenid
NaF	Natriumfluorid
NaOH	Natriumhydroxid
Nb	Niob
NH_3	Ammoniak
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
O_2	molekularer Sauerstoff
O_3	Ozon
P	Phosphor
Pb	Blei
PCl_3	Phosphortrichlorid
PEG	Polyethylenglycol
PET	Polyethylenterephthalat
PH_3	Phosphin
$POCl_3$	Phosphoroxychlorid
PVB	Polyvinylbutyral
S	Schwefel
Sb	Antimon

Sb_2Te_3 - Zn_2SnO_4

Sb_2Te_3	Antimontritellurid
Se	Selen
SF_6	Schwefelhexafluorid
Si	Silizium
Si_3N_4	Siliziumnitrid
SiC	Siliziumcarbid
$SiCl_4$	Siliziumtetrachlorid (**STC**)
SiF_4	Siliziumtetrafluorid
SiH_2Cl_2	Dichlorsilan (**DCS**)
SiH_3Cl	Monochlorsilan (**MCS**)
SiH_4	Monosilan (**MS**)
$SiHCl_3$	Trichlorsilan (**TCS**)
SiO	Siliziumoxid
SiO_2	Siliziumdioxid
Sn	Zinn
Ta	Tantal
Ta_2O_5	Tantalpentoxid
Te	Tellur
TEG	Triethylenglycol
Ti	Titan
TiO_2	Titandioxid
V	Vanadium
W	Wolfram
$ZnIn_2Se_4$	Zinkindiumselenid
ZnO	Zinkoxid
ZnS	Zinksulfid
ZnSe	Zinkselenid
Zr	Zirkonium
Zn_2SnO_4	Zinkzinnoxid (**ZTO**)

KAPITEL 1

EINFÜHRUNG

Im Zuge der Energiewende erfolgte in den letzten beiden Dekaden ein erheblicher technischer Fortschritt in allen Bereichen der erneuerbaren Energien. Durch Vergütungsmodelle wie das Stromeinspeisegesetz, das Aachener Modell und schließlich das Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (kurz: EEG) erhielt neben der Windkraft vor allem die Photovoltaik Einzug in den Energieträgermix im Stromsektor. Eine Wende in der Energieversorgung hin zu erneuerbaren Energien bringt einerseits zahlreiche Vorzüge mit sich. Dies betrifft die Begrenzung von Treibhausgasemissionen im Interesse des Klimaschutzes, aber auch die Ressourcenschonung nicht nachwachsender Rohstoffe einschließlich der dadurch bewirkten Verringerung der Importabhängigkeit bei Energieträgern. Andererseits sind auch erneuerbare Energien abhängig von einer zunehmenden Ressourcenverknappung. Bei einer steigenden Nachfrage nach diesen Technologien ist die Frage der ausreichenden und nachhaltigen Versorgung der Produktion mit kritischen Rohstoffen essentiell. Naheliegend ist hier deren Substitution durch nachwachsende oder im Überfluss vorhandene Rohstoffe, beziehungsweise eine Kreislaufführung selbiger - genau an dieser hochaktuellen Problematik setzt die Arbeit an.

Kapitelfeingliederung

1.1 UNTERSUCHUNGSSCHWERPUNKTE 2
1.1.1 Technologische Grundlagen 3
1.1.2 Recycling unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten 4
1.1.3 Regionale Fragestellungen 5
1.2 FORSCHUNGSBEITRAG UND AUFBAU DER ARBEIT 6
1.3 LITERATURANALYSE UND STAND DER WISSENSCHAFT 10
1.3.1 Physikalische Grundlagen 10
1.3.2 Solarzellentechnologien 13
1.3.3 Modul- und Anlagentechnik 15
1.3.4 Produktionstechnologien 17
1.3.5 Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule 19
1.3.6 Zusammenfassung und weitere Aspekte 21
1.4 BESTÄTIGUNG DER FORSCHUNGSLÜCKE UND METHODIK 23

1.1 Untersuchungsschwerpunkte

Für ein nachhaltiges Wirtschaften ist Recycling von außerordentlicher Bedeutung, da es die natürliche Umwelt nicht nur als Ressourcenlieferant, sondern ebenfalls als Rückstandsaufnahmemedium zu entlasten vermag. Dabei kann nicht nur der vor Ort generierte Abfall zur Ressourcenerzeugung genutzt werden, vielmehr kann ein Import von bestimmten Abfallströmen eine Rohstoffsenke darstellen. Bezogen auf photovoltaische Systeme steckt die Recyclingindustrie noch „in den Kinderschuhen“. National und regional lassen sich kaum gefestigte Strukturen erkennen – allenfalls vereinzelte Ansätze. Das Potenzial einer möglichen Photovoltaikrecyclingindustrie ist indessen sehr hoch. Da die erste Generation installierter Solarmodule allmählich infolge des technischen Fortschritts und möglicherweise durch das Erreichen der Lebensdauer als Altmodule anfällt, erscheint die Existenz einer Recyclingindustrie als sinnvoll. Gleichwohl bringt die Heterogenität der Solartechnologie zahlreiche Probleme mit sich. Vor diesem Hintergrund verfolgt die Arbeit nachstehende Untersuchungsschwerpunkte.

1.1.1 Technologische Grundlagen

Die Heterogenität der Solartechnologie und die damit einhergehenden Probleme betreffen neben den unterschiedlichen verwendeten Rohstoffen auch die ungleichen Zellenkonzepte mit ihren jeweiligen Produktionsprozessen. Eine genaue technologische Betrachtung der Photovoltaik, der physikalischen Grundlagen und der sich daraus ergebenden Restriktionen stellt deshalb die Basis zur Beschreibung möglicher Recyclingprozesse dar. Dies ist notwendig, um die Zusammenhänge zwischen Produktion, benötigten Rohstoffen, Substituierbarkeit und schließlich dem Recycling zu verstehen. Wichtig ist dabei nicht nur, den generellen Aufbau der Zellen und die Nutzung des photovoltaischen Effektes zu beschreiben, sondern die zur Produktion eines Standardmoduls benötigten Rohstoffe und Energien sowie sich ergebende Kosten aufzugreifen. Weiter ist eine Betrachtung der globalen und nationalen Photovoltaikmärkte notwendig, um mögliche Tendenzen aufzuzeigen. Darauf aufbauend wird die zeitraumabhängige Verortung installierter Photovoltaikanlagen auf regionaler Ebene herausgearbeitet. Zusammen mit der Betrachtung der Wirkungsgrade, der technologischen Entwicklung der einzelnen Zellenkonzepte und der regionalen Produzentenclusterung kann so anschließend der betrachtungsrelevante Untersuchungsrahmen definiert werden.

Derweil finden auch spezielle Fragestellungen zu den Produktionsprozessen Beachtung. Neben den einzelnen Fertigungsschritten wird sonach auch vertieft auf die produktionsrelevanten Rohstoffe eingegangen. Zudem steht die Diskussion von resultierenden Restriktionen oder möglichen Abhängigkeiten an verschiedenen Beispielen im Fokus. Gleichwohl ergibt sich daraus die Chance, technologische Fragestellungen bezüglich potenzieller Recyclingaktivitäten zu adressieren. Ferner können etwaige resultierende Effekte, die spezifische Recyclingansätze zeitigen, sowohl hinsichtlich der damit verbundenen Risiken als auch auf ihre Potenziale und regionalen Aspekte hin analysiert werden. Über diese speziellen Fragestellungen hinaus wird ein mögliches Recycling aber auch generell aus technologischer Sicht hinterfragt. Welchen Bestand kann ein Recycling bei einer sich entwickelnden Technologie wie der Photovoltaik haben? Durch die anhaltenden und im Investitionsvolumen stetig steigenden Forschungsprojekte werden auch weiterhin neue Zellenkonzepte entwickelt. Diese unterscheiden sich grundlegend im Aufbau und in den genutzten Rohstoffen. Es ist klar, dass eine speziell ausgerichtete Recyclingtechnologie hier unkalkulierbaren Risiken unterliegt. Dies gilt es nun im zweiten Schwerpunkt näher zu betrachten:

1.1.2 Recycling unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten

Recycling ist volkswirtschaftlich kein Selbstzweck. Es kann helfen Rohstoffe einzusparen und das Abfallaufkommen zu reduzieren, verursacht aber auch Transaktions- sowie Behandlungs- und Aufbereitungskosten. Wichtig sind bei der wirtschaftlichen Betrachtung daher nicht nur die Risiken und Hemmnisfaktoren, die aus den technologischen Aspekten resultieren, sondern auch die Kosten, die sich für potenzielle Recycler ergeben. Welchen Einzugsradius und welche Menge an Photovoltaikaltmodulen braucht ein Recycler, um wirtschaftlich arbeiten zu können? Dabei ist zu unterscheiden, ob es sich um ein spezielles Recyclingverfahren handelt oder ob ein genereller Ansatz verfolgt wird. Ebenfalls ist eine Kooperation verschiedener Recyclingspezialisten denkbar (Spezialisten für Glas, Ethylenvinylacetat (kurz: EVA), Aluminium, Silizium et cetera). Zusätzlich wird der Frage nachgegangen, welche Art von Modulen wann anfällt. In Abhängigkeit von der Effizienz des Recyclingprozesses, dem Einzugsgebiet für Altmodule und dem maximal erzielbaren Sekundärrohstoffpreis ergeben sich regionalspezifische kritische Mengen an benötigten Modulen für wirtschaftliche Recyclingprozesse. So ist zu klären, welcher dieser Faktoren in welchem Umfang beeinflusst werden kann, um die Prozesse anzupassen. Ein weiterer Gesichtspunkt ist die mögliche Öffnung eines entstehenden Marktes für andere Branchen. So können andere Industriezweige wesentlich geringere Qualitätsanforderungen an Sekundärrohstoffe aus den PV-Recyclingprozessen besitzen.

Weiter stellen die bisher unbefriedigend geklärte Frage nach der Lebensdauer von installierten Modulen und die darauf basierende Prädiktion etwaiger anstehender Altmodulströme eine zentrale Rolle dar – der qualitativ hochwertigen Prognose der Menge anfallender Altmodule kommt ein essenzieller Charakter zu. Obwohl deren Genauigkeit und Aussagekraft erhebliche Auswirkungen auf die Auslegung potenzieller Recyclingprozesse unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zeitigen, sind bislang keine wissenschaftlich fundierten Ansätze oder Modelle verfügbar. Darüber hinaus kann eine Betrachtung mittels verschiedener Szenarien hier helfen, die Menge potenziell anfallender Altmodule möglicherweise regional aufzuschlüsseln.

1.1.3 Regionale Fragestellungen

Auf den gewonnenen Erkenntnissen der beiden vorbezeichneten Untersuchungsschwerpunkte aufbauend stellt sich die Frage, ob die Implementation von Sekundärrohstoffmärkten für PV-Rohstoffe regionale Mehrwerte generieren kann. In erster Linie wird daher untersucht, ob es für die vorliegende Arbeit sinnvoll ist, eine Region unabhängig von der Wertschöpfungskette zu definieren und insoweit regionale Wirtschaftsförderung zu etablieren. So muss die Wahl der Bilanzgrenzen begründet sein und darf nicht willkürlich festgelegt werden. Da der Fokus auf dem Freistaat Sachsen als Betrachtungsschwerpunkt gelegt wurde, sind die Restriktionen, die ein Modulimport aus Polen und Tschechien, aber auch aus anliegenden Bundesländern wie Bayern und Sachsen-Anhalt unterliegt, zu beachten sowie gesetzliche und hoheitliche Rahmenbedingungen bei grenzübergreifenden Betrachtungen aufzuzeigen.

Weiter wird untersucht, inwiefern die Ergebnisse das ostdeutsche PV-Produktionscluster stärken können und ob sich für Sachsen die Möglichkeit zur Erzeugung einer Rohstoffsenke ergibt. Wenngleich das ostdeutsche PV-Produktionscluster den primären Betrachtungsraum aufspannt, bleibt der Fokus während der gesamten Arbeit auf Sachsen erhalten. Sachsen stellt dabei den zentralen Punkt jeglicher regionalen Betrachtungen und einer transportwirtschaftlichen Optimierung dar; auch bedingt durch seine günstige Lage für einen möglichen Modulimport aus östlichen Anrainerstaaten. Zudem können so die regionalen Gegebenheiten mit den desideraten Voraussetzungen für die Etablierung etwaiger Recyclingstrukturen abgeglichen werden, um daraus potenziell existierende Hemmnisfaktoren zu identifizieren und mögliche Empfehlungen abzuleiten.

1.2 Forschungsbeitrag und Aufbau der Arbeit

Wenngleich eine strukturierte Diskussion thematischer Abgrenzungen bedarf, gestaltet sich eine separate sowie scharf trennende Bearbeitung der vorbezeichneten Aspekte und der dargelegten Untersuchungsschwerpunkte in der gegebenen dreigliedrigen Form als schlicht nicht möglich. Es obwaltet eine Vielzahl betrachtungsrelevanter Überschneidungen, Wechselwirkungen und Abhängigkeiten. Dieserhalb orientiert sich der grundlegende Aufbau der vorliegenden Arbeit indessen an der Beantwortung der folgenden zentralen Fragestellungen:

> *Was bedingt die gegenwärtige Disproportionalität zwischen der verfügbaren Technologie eines ökologisch hochwertigen Recyclings kristalliner Siliziumsolaraltmodule, welches auch die Funktionsmaterialien einbegreift, und deren realen Anwendungsspektrum? Welche technischen, ökonomischen und rechtlichen Restriktionen existieren und was sind diesbezüglich die prävalierenden Hemmnisfaktoren – auch auf regionaler Ebene? Lassen sich hochwertige Recyclingstrukturen auch regional langfristig etablieren und was sind dafür die desideraten Bedingungen?*

Um jedoch ein Recycling auf ökonomische, ökologische und regionale Abhängigkeiten hin zu analysieren, ist zuvörderst die technische Ebene als notwendige Bedingung zu untersuchen; oder anders ausgedrückt: Die verfahrenstechnische Realisierbarkeit ist Grundvoraussetzung für die Existenz betrachtungsrelevanter Strukturen oder die bisweilen ausstehende aber obligate initiale Investition in potenzielle Recyclingaktivitäten. Allerdings zeigen sich auch bezüglich der technologischen Untersuchungsschwerpunkte thematische Abhängigkeiten. Eine Diskussion der denkbaren, erprobten oder im Labormaßstab betriebenen Recyclingansätze setzt die Kenntnis des substanziellen Aufbaus, der stofflichen Zusammensetzung und konstruktionsbedingter Spezifika des adäquaten Prozessinputs – Photovoltaikaltmodule – voraus. Diese basieren wiederum auf der zugrunde liegenden Fertigungssequenz, welche naturgemäß von Hersteller zu Hersteller und zwischen den einzelnen Technologiepfaden variiert. Es sind sonach in einem vorgelagerten Schritt die verschiedenen Produktionsschritte hin zu einem Photovoltaikmodul zu analysieren. Dies hilft zudem die essenziellen Spezifikationen etwaiger Sekundärrohstoffe aus dem Recycling für eine Rezyklierung zu identifizieren. Wie bereits bei den Untersuchungsschwerpunkten zu den technologischen Grundlagen

dargelegt, geht die Vielfalt innerhalb der photovoltaischen Produktfamilie über einzelne materielle Unterschiede weit hinaus. Gleiches gilt analog für die Fertigungsverfahren. Es ist daher notwendig eine Differenzierung innerhalb des gesamten Spektrums der Technologie auf oberster Ebene zu treffen, da sich die einzelnen Technologieklassen zwar in der Nutzung des photovoltaischen Effektes und eines pn-Übergangs gleichen, sich in der technischen Umsetzung dafür jedoch grundlegend unterscheiden – insbesondere in der konstitutiven Zusammensetzung der photoaktiven Schicht samt des daraus resultierenden Modulaufbaus. Die Fokussierung auf eine spezifische Technologieklasse erfolgt indessen nicht anhand des technologischen Fortschritts der zugehörigen Recyclingverfahren, der Quantität der verfügbaren Publikationen, dem Stand der Wissenschaft oder gar willkürlich; einzig die herausgearbeitete Marktdominanz installierter Kapazitäten der einzelnen Technologieklassen und damit das zukünftig verfügbare Volumen an technologiespezifischen Altmodulen ist entscheidend.

Wenngleich sich die Fertigungssequenzen auch innerhalb einer Technologieklasse herstellerabhängig in bestimmten Details okkasionell unterscheiden können, gleichen sie sich in den substanziellen Verfahrensschritten auf Modulebene. Allerdings können im Falle der kristallinen Siliziumsolartechnologie Module, die eine nahezu identische Fertigungssequenz durchlaufen haben, trotzdem unterschiedliche Zellenkonzepte nutzen. Dieserhalb sind neben der Produktion der Module die zugrunde liegenden Zellentechnologien zu betrachten, da diese die Funktionsmaterialien auf heterogene Weise mit in das Endprodukt einbringen. Diese Funktionsmaterialien sind zwar im Vergleich zu den Massenanteilen anderer Komponenten als unbedeutend einzustufen, besitzen dafür aber aus ökonomischer und ökologischer Perspektive mitunter eine hohe Relevanz.

In toto zeigt sich, dass für die Herleitung und fachliche Analyse einzelner technologischer Aspekte ein Grundlagenwissen bereitzustellen ist. Dies umfasst nicht nur die Solarzellenkonzepte als unterste Fertigungseinheit, sondern vor allem die restriktiven, aber auch die notwendigen physikalischen Zusammenhänge.

Es bietet sich sonach eine hierarchische Struktur auf technischer Ebene dar, welche gleichwohl als übergeordnete Gliederung und als Leitfaden dient.

Das Fundament der Arbeit bildet entsprechend das **Kapitel 2** mit der Erläuterung der physikalischen Grundlagen samt einer Einführung in die Thematik der Halbleiter und der Funktionsweise eines pn-Übergangs, des benötigten solaren Strahlungsspektrums sowie einzelner relevanter Aspekte zur Lichtabsorption.

Anschließend wird im **Kapitel 3** eingangs das zuvor vermittelte Grundlagenwissen zur Beschreibung des photovoltaischen Effektes zusammengeführt. Die Kenntnis dieser substanziellen Funktionsweise stellt das desiderate Wissen für die nachfolgenden Untersuchungen dar. Weiterer Schwerpunkt ist die ausführliche Betrachtung der einzelnen Zellentechnologien.

Im **Kapitel 4** wird anhand einer initialen Marktanalyse der weitere technologische Untersuchungsrahmen auf die kristalline Siliziumsolartechnologie abgegrenzt, worauf eine detaillierte und umfassende Analyse des Hauptgegenstandes des Kapitels – die Produktion eines Standardmoduls – erfolgt. Gleichwohl werden spezielle Ingredienzien eines kristallinen Siliziumsolaraltmoduls auf etwaige Umwelteffekte und Gesundheitsgefährdungspotenziale sowie deren Verfügbarkeit und mögliche Importabhängigkeiten hin kritisch untersucht. Zuletzt werden die Standorte existierender Produzenten auf den verschiedenen Fertigungsebenen lokalisiert und so eine regionale Eingrenzung der Betrachtung getroffen.

Das **Kapitel 5** beinhaltet schließlich den zentralen Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit: das Recycling. Hierfür werden zuvörderst die relevante europäische Gesetzgebung und die nationalen rechtlichen Restriktionen gegenübergestellt und auf etwaige Obliegenheiten und Anforderungen hin untersucht. Danach schließt sich mit dem Entwurf und der Auswertung eines eigenen Prognosemodells für künftig zu erwartende Altmodulströme (auch auf regionaler Ebene) ein herauszustellender Forschungsbeitrag dieser Arbeit an. Dieses Modell beruht auf den Erkenntnissen aller vorangegangenen Kapitel und stellt, speziell die Prädiktion des regionalen Aufkommens kristalliner Siliziumsolaraltmodule betreffend, den ersten existierenden Ansatz, der fachlich fundiert und vor allem in seinen Annahmen begründet ist, dar; zumindest soweit bekannt. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Auswertung verfügbarer technologischer Konzepte und womöglich erprobter Verfahren auf die Eignung zum Recycling von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen, wobei gezielt auch ökologische Fragstellungen Beachtung finden. Hierfür werden bewusst energetische und materielle Einsparpotenziale eines Recyclings zur Verwendung und eines Recyclings zur Verwertung gegenüber einer

reinen Neuproduktion herausgearbeitet. Gleichwohl wird aber auch auf eine möglicherweise resultierende bilanzielle Mehrbelastung infolge eines Recyclings oder der steten Fortentwicklung der Produktionstechnologien (speziell hinsichtlich energetischer Einsparungen) eingegangen. Im Anschluss daran wird ein weiterer zentraler Forschungsbeitrag dieser Arbeit entwickelt: über die ökonomische Analyse der bisher gewonnenen Erkenntnisse mit Bezug auf die Wirtschaftlichkeit potenzieller regionaler Recyclingaktivitäten werden die Break-evens der Nettogegenwartswerte unter verschiedenen Gegebenheiten als finanzmathematisches Entscheidungskriterium hinsichtlich der desideraten Initialinvestition in geeignete Recyclingstrukturen ermittelt und diskutiert. Teilaspekte sind neben der Untersuchung der möglichen Absatzmärkte für die Sekundärrohstoffe eine Betrachtung der Verfahrenskosten sowie die Analyse der Sammel- und Transportkosten. Weiter wird exemplarisch für das ostdeutsche PV-Produktionscluster eine Standortoptimierung vorgenommen, um zwar repräsentative, aber faktisch rein theoretische und teils abstrahierte Kostenstrukturen zu generieren. Darauf aufbauend werden auch konstruktionsbedingte Beeinflussungen jener ökonomischen Aspekte untersucht. Dies zielt vordergründig auf recyclingorientierte Modulkonzeptionen ab. Zudem werden eventuell anstehende Materialsubstitutionen und marktgetriebene Veränderungen in der stofflichen Zusammensetzung der Module auf ihre Risiken und Chancen für potenzielle Recyclingaktivitäten hin geprüft. Weiterer Betrachtungsgegenstand dieses Hauptkapitels ist eine Diskussion fortführender Optimierungsansätze sich theoretisch ergebender Recyclingnetzwerke.

Kapitel 6 fasst abschließend die während der gesamten Arbeit identifizierten Herausforderungen exhaustiv zusammen und definiert darüber hinaus den resultierenden weiteren Forschungsbedarf. Gleichwohl werden auch etwaige volkswirtschaftliche Effekte hinterfragt – zumindest ansatzweise und sofern es der bisherige Kenntnisstand überhaupt zulässt.

1.3 Literaturanalyse und Stand der Wissenschaft

Zur weiteren Konsolidierung der identifizierten Forschungslücke soll nicht alleinig die gängige detaillierte Beschreibung des Standes der Wissenschaft hinsichtlich der technologischen Grundlagen dienen, vielmehr wird eine Darstellung, Strukturierung und kritische Analyse des Standes der Literatur und deren Bewertung für die Durchführung der beschriebenen Untersuchungen fokussiert; der Stand der Wissenschaft wird indessen direkt in den jeweiligen zentralen Kapiteln präzisiert. Die nachfolgende Literaturanalyse orientiert sich zudem an der zuvor herausgearbeiteten hierarchischen Struktur auf technischer Ebene und sonach am übergeordneten Aufbau der Arbeit – den Hauptkapiteln.

Wie bereits deutlich betont, stellen die physikalischen Grundlagen das Fundament aller darauf folgenden technologischen Betrachtungen dar. Hier gilt es im Zuge der Literaturanalyse vordergründig zu untersuchen, ob es sich um gesichertes Wissen im wissenschaftlichen Sinne handelt. Da die Photovoltaik eine lebende und sich entwickelnde Technologie darstellt, kann in der sich anschließenden kritischen Sichtung der vorhandenen Literatur über bestehende Zellenkonzepte und sich in der Entwicklung befindliche Solarzellen indessen nur ein begrenzter Überblick gegeben werden. Mit der Evolution der Solarzellenkonzepte schreiten auch die zugehörigen Produktionsstrukturen und –verfahren technologisch voran. Deshalb ist die Verfügbarkeit der Literatur für die Produktionsprozesse der Etablierung des zugehörigen Zellendesigns äquivalent. Grundlegend muss hier jedoch zwischen Produktionsprozessen für Laborzellen und kommerziellen Ablegern unterschieden werden.

1.3.1 Physikalische Grundlagen

Solarzellen bestehen aus Halbleitern. Die Funktionsweise von Halbleitern und der damit verbundene Vorgang der lichtinduzierten Ladungsträgertrennung stellt die Grundlage des photovoltaischen Effektes dar. Dieses Unterkapitel beschäftigt sich deshalb mit der Literatur zu den physikalischen Grundlagen, wie beispielsweise dem Bändermodell der Halbleiter, der Halbleiterdotierung, dem pn-Übergang und weiteren relevanten Aspekten. Die Literatur wird darauf hin untersucht, ob es sich bei den physikalischen Grundlagen um gesichertes Wissen handelt und führt dazu etwaige Standardwerke beziehungsweise Vergleiche zwischen Standardwerken auf.

Wie jegliches Material sind Halbleiter aus Atomen aufgebaut. Die Eigenschaften spezifischer Atomarten beeinflussen somit die Halbleiterfunktionsweisen. Zur Untersuchung der elementaren Eigenschaften, die auf die Nutzung von Halbleitern in Photovoltaiktechnologien hinzielen, eignen sich sowohl Standardwerke der Atomphysik als auch halbleiterspezifische Standardwerke und Literatur zum grundlegenden Atomaufbau. Wenngleich das Rutherford-Bohrsche Atommodel durch weitere Forschungsergebnisse und nach dem Standpunkt der modernen Atomphysik nicht als Zustandsrealität, sondern nur als Rechenschema angesehen werden darf, wird es wegen seiner Handhabbarkeit und Anschaulichkeit in den meisten Standardwerken zugrunde gelegt. Eines der bekanntesten Werke, welches sich dieser Betrachtungsweise bedient und einen guten Überblick über viele naturwissenschaftliche Grundlagen gibt, stellt das 1959 erschienen Sammelwerk [Birnbaum *et al.* 1959]: „Das Grundwissen des Ingenieurs“ dar. Diese Handhabe zieht sich durch nahezu jegliche Fachliteratur der meisten naturwissenschaftlichen Fachgebiete. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um aktuelle Literatur oder ältere Werke, englischsprachige oder deutsche Schriften, beziehungsweise Grundlagenbücher oder sehr spezielle Literatur zum Thema Halbleiter handelt. Als Beispiel sollen hier die Werke [Mertens 2011]: „Photovoltaik“ und [Kaltschmitt *et al.* 2005b]: „Erneuerbare Energien“ aufgeführt sein. Häufig wird die Kenntnis des Rutherford-Bohrschen Atommodels jedoch auch vorausgesetzt oder darauf aufbauende neuere Betrachtungen zugrunde gelegt. Diesen Ansatz verfolgen beispielsweise halbleiterspezifische Standardwerke wie [Sze und Ng 2007]: „Physics of Semiconductor Devices“, [Fraas und Partain 2010]: „Solar Cells and Their Applications“ und [Grundmann 2006]: „The Physics of Semiconductors“. Dass es sich dabei um die gängige Praxis handelt, zeigt das Buch [Grundmann 2006]. Der Autor Herr Prof. Grundmann ist Inhaber des Lehrstuhls Halbleiterphysik am Institut für Experimentelle Physik II der Universität Leipzig. Seine Mitarbeiter nutzen das Buch für die Lehre am Institut.

Die im Sinne der Photovoltaik nutzbaren Eigenschaften von Halbleitern bedingen sich in den spezifischen Eigenschaften der enthaltenen Atome. Allen voran stellt die stoffspezifische Bandlücke (Abstand Oberkante Valenzband und Unterkante Leitungsband) die Hauptrestriktion dar. Diese ist entscheidend für den spektralen und den maximalen theoretischen Wirkungsgrad einzelner Solarzellentechnologien. Weitere Eigenschaften wie die Mechanismen zur Bereitstellung von Ladungsträgern in Halbleitern durch Eigenleitung und Störstellenleitung beziehungsweise der Ladungstransport im Halbleiter durch

Feldströme und Diffusionsströme beeinflussen ebenfalls deren Verwendbarkeit in der Photovoltaik. Die genaue Betrachtung dieser Mechanismen ist daher unabdingbar. Gleichwohl kann durch den Vergleich älterer und neuerer Literatur die wissenschaftliche Beständigkeit bezüglich der beschriebenen Mechanismen überprüft werden. Hierzu eignet sich der Vergleich der Werke [Cassignol 1966]: „Halbleiter“ (Seiten 25ff) sowie [Enderlein und Schenk 1992]: Grundlagen der Halbleiterphysik“ auf den Seiten 227ff mit dem bereits aufgeführten Werk [Grundmann 2006, S. 189ff].

Wenngleich die beschriebene Literatur nur einen kleinen Auszug aus der verfügbaren Masse darstellt, reicht sie in ihrer Qualität zur Beschreibung der physikalischen Grundlagen des pn-Übergangs und der Halbleitereigenschaften völlig aus. Allerdings sollten immer mindestens zwei Werke zu Rate gezogen werden, da sie mitunter kleinere Fehler enthalten.[1]

Da der maximale theoretische Wirkungsgrad von Solarzellen neben den atomaren Eigenschaften auch von den zur Verfügung stehenden Wellenlängen und ihrer Intensität abhängt, ist zudem die Betrachtung der Phänomene, welche eine Veränderung des Sonnenspektrums in der Erdatmosphäre bedingen, obligat.

Für die Beschreibung jener Extinktionsvorgänge in der Erdatmosphäre eignet sich vor allem Literatur aus dem Bereich der Meteorologie, insbesondere die Werke [Kraus 2004, S. 95ff]: „Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie“, [Liljequist und Cehak 2006, S. 8ff]: „Allgemeine Meteorologie“ sowie [Häckel 2005,] mit „Meteorologie“ auf den Seiten S. 183ff. Weiterführende Informationen und Berechnungen sind den Werken [Hupfer und Kuttler 2006]: „Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie“ (Seite 45ff), sowie [Foitzik und Hinzpeter 1958, Seite 53ff]: „Sonnenstrahlung und Lufttrübung“ in Verbindung mit gängigen Tafelwerken zu entnehmen. In allen Werken wird neben den Extinktionsvorgängen ebenfalls das Konzept der Air Mass definiert und geschildert.

Ein wesentlicher Aspekt des photovoltaischen Effektes ist die Absorption des auf der Erdoberfläche tatsächlich nutzbaren Strahlungsanteils. Da die Lichtabsorption in Halbleitern einen photovoltaikspezifischen Vorgang darstellt, ergibt sich hier ein anderes Bild bezüglich der verwendbaren Literatur. Die dabei stattfindenden Vorgänge und

[1] So ist beispielsweise in [Mertens 2011] auf Seite 66 die Zeit als Produkt aus Geschwindigkeit und Weg definiert.

vorherrschenden Restriktionen finden in den Standardwerken zu Halbleitern nur in Unterkapiteln Platz. Stattdessen muss dafür spezielle Literatur über photovoltaische Systeme und Solarzellentechnologien herangezogen werden. Hier findet sich die Thematik der Lichtabsorption meist in den Einführungskapiteln. Beispielhaft seien hier wiederum die Werke [Kaltschmitt und Rau 2005, S. 202f] sowie [Mertens 2011, S. 75ff] aufgeführt. Die technische Beeinflussung der Lichtabsorptionsraten mittels Antireflexionsbeschichtungen und texturierten Oberflächen stellt einen wesentlichen Eckpfeiler in der Evolution der Solarzellentechnologie dar. Für die zugehörige Literatur wird deshalb auf die nachstehenden Unterkapitel verwiesen. Gleichwohl sind die Berechnung optimaler Schichtdicken und Materialien für eine Antireflexbeschichtung auch bei anderen Technologien zentraler Bestandteil (Flachbildschirme und Objektive). Aus diesem Grund findet sich mannigfaltig Literatur zur Nutzung der Fresnel'schen Formel auch aus anderen Wissenschaftsgebieten – speziell der Optik.

1.3.2 Solarzellentechnologien

Zur allgemeinen Beschreibung der Funktionsweise und des Aufbaus von Siliziumsolarzellen eignet sich jegliche Standardliteratur, die die technologischen Grundlagen wie den photovoltaischen Effekt behandelt. Für eine einfache, aber leicht verständliche Einführung in die Thematik wird abermals auf das Lehrbuch [Mertens 2011] ab Seite 84 verwiesen. Gleichwohl eignen sich die Bücher [Schmidt 2002, S. 130ff] und [Kaltschmitt *et al.* 2005b], um einen ersten Einblick in die allgemeinen Funktionsweisen siliziumbasierter Solarzellen zu erlangen. Für spezielle Zellendesigns wie beispielsweise die PERL-Zelle, die Buried-Contact-Zelle oder die Rückkontaktzelle sollte hingegen auf adäquate Literatur zurückgegriffen werden. Neben fachspezifischen Sammelwerken empfiehlt sich auch die Suche nach Literatur von Mitbegründern oder Erfindern spezieller Solarzellendesigns. An dieser Stelle sei exemplarisch die Forschergruppe um Herrn Ronald A. Sinton von der Stanford University genannt, die durch intensive Forschungen und Weiterentwicklungen das Konzept der Rückkontaktzelle etablierten [King *et al.* 1989]. Im Gegensatz dazu benennen die Werke [Fraas und Partain 2010] sowie [Goetzberger und Hoffmann 2010] zwar nicht ausschließlich siliziumbasierte Solarzellentechnologien, diese aber im ausreichenden Umfang. Allerdings ist bei zellenunspezifischer Literatur auf aktuelle Werke Wert zu legen.

Auch für Fragestellungen bezüglich spezieller Technologien zur Minderung der Verluste (optische, ohmsche und rekombinatorische) in einer Zelle sollte Fachliteratur herangezogen werden. Eine weitere Möglichkeit bietet auch hier die gezielte Suche nach Publikationen wie beispielsweise von der Forschergruppe um Herrn Professor Eli Yablonovitch: „Intensity Enchancement in Textured Optical Sheets for Solar Cells“ [Yablonovitch und Cody 1982] und „Statistical ray optics“ [Yablonovitch 1982]. Herr Prof. Eli Yablonovitch verfügt über langjährige Erfahrungen in der Solarzellentechnologie und führte den sogenannten „$4n^2$ light-trapping-Faktor“ ein, der auch in heutigen Solarzellenkonzepten zur Erhöhung des Wirkungsgrades durch Light-Trapping Anwendung findet. Speziell im Bereich der siliziumbasierten Solarzellentechnologie muss zudem auf Herrn Prof. Martin Green und seine Kollegen von der University of New South Wales (UNSW) in Australien hingewiesen werden. Herr Prof. Green und seine Kollegen stellten seit 1984 immer wieder neue Wirkungsgradweltrekorde mit Laborzellen auf und entwickelten dabei bekannte Zellentypen wie bspw. die MINP-Zelle, die Buried-Contact-Zelle und die PERL-Zelle.

Zur Überprüfung aktueller Wirkungsgrade und neuster Zellenkonzepte bietet die Arbeitsgruppe um Herrn Green über die Wiley Online Library eine halbjährlich erscheinende (aktuelle Version: 47, Stand Dezember 2015) Übersicht der aktuellen Wirkungsgradrekorde an [Green *et al.* 2015]. Für Laborzellenkonzepte eignet sich ingleichen auch die vom National Renewable Energy Laboratory (NREL) zyklisch aktualisierte Übersicht in [NREL 2015]. Die benannten Übersichten beinhalten nicht nur verschiedenste Konzepte kristalliner Siliziumzellen, sondern auch Dünnschichtzellen, amorphe/nanokristalline Siliziumzellen, organische, photochemische und Stapelzellenkonzepte. Für jede der, neben den kristallinen Siliziumzellen, genannten Solarzellentypen ist spezielle Literatur verfügbar. Exemplarisch sei hier das Sammelwerk [Poortmans und Arkhipov 2006]: „Thin Film Solar Cells“ aufgeführt.

Gleichwohl finden sich ausreichend Informationen in bereits genannten Sammelwerken und allgemeiner Literatur über Solarzellentechnologien. Dort bilden sie Unterkapitel auf gleicher Stufe zu den siliziumbasierten Technologien.

Eine technisch sehr tiefgründige Analyse und Beschreibung aller Solarzellenkonzepte (Stand 2012) gibt das Sammelwerk [McEvoy *et al.* 2012]: „Practical handbook of photovoltaics“. Es erweist sich als vielschichtig, gut recherchiert und konzeptionell ausgereift, weshalb es dem interessierten Leser als Empfehlung gelten soll.

Durch die vorherrschende Marktlage und das damit einhergehende Potenzial für ein mögliches Recycling mit einer volumenabhängigen Restriktion ist derzeit einzig die Betrachtung von Modulen aus kristallinen Siliziumzellen sinnvoll. Selbst wenn andere Ansätze das Potenzial besitzen, die Marktanteile in Zukunft zu verschieben, sind sie derzeit durch ihren marginalen technologiespezifischen Marktanteil und der hohen Lebensdauer noch von unerheblicher Bedeutung für ein mögliches Recycling. Das spiegelt sich ebenso in der Verfügbarkeit der Literatur wider.

1.3.3 Modul- und Anlagentechnik

Auch die Betrachtung der Module findet in der gängigen Literatur zu Solarzellentechnologien zumeist Platz in Unterkapiteln, wenngleich diese nicht deren primären Forschungsgegenstand darstellen. Literatur, die ausschließlich Module und deren Aufbau aufgreift, befasst sich hingegen meist mit deren Verschaltungsoptimierung und planerischen Aspekten für den Bau einer Photovoltaikanlage, wie beispielshalber eine optimale Auslegung der Systemkomponenten. Da die stoffliche Zusammensetzung und die nötigen Prozesse während der Modulproduktion für das Modulrecycling, inklusive des damit einhergehenden Entlaminierungsprozesses, eine entscheidende Rolle spielen, offenbart sich an dieser Stelle ein Bedarf an adäquater Literatur. Allenfalls Poster und Diskussionen auf PV-Recyclingkonferenzen[2] greifen aktuelle Themen wie recyclingorientierte Produktion und das damit verbundene Moduldesign, wenn auch nur Teilbereiche davon, auf. Obschon ein Bedarf an entsprechender Literatur besteht, können zur Beschreibung und Analyse der stofflichen Zusammensetzung von Standardmodulen (unabhängig vom Zellentyp) mitunter auch bereits beschriebene allgemeine Werke genutzt werden.

Wie zu jedem Modul mehrere Solarzellen gehören, besteht eine Anlage wiederum aus mehreren Modulen (mindestens jedoch einem Modul), einer Aufständerung, einer für den vorgesehenen Zweck adäquaten Befestigung, einem Wechselstromrichter, verschiedensten Anschlüssen und Kabeln sowie, je nach Anwendungsfall, einem Speicher. Einen einfachen Einstieg in die Verschaltung und Notwendigkeit aller Systemkomponenten einer Photovoltaikanlage bietet [Schmidt 2002] ab Seite 135. Je nachdem, welcher

[2] Hierzu zählt beispielshalber die im Jahr 2013 von der Organisation PV Cycle in Rom durchgeführte internationale Fachkonferenz: „3rd International Conference on PV Module Recycling“.

Systembestandteil betrachtet werden soll, eignet sich unterschiedliche Literatur. Gleichwohl ist bei der Unterteilung der Betrachtung der Systemkomponenten auch eine Unterscheidung bezüglich des Betrachtungsziels und der dafür vorhandenen Literatur angebracht. So stellt sich die Verfügbarkeit adäquater Literatur für die einzelnen Zellentechnologien und Module je nach Zweck (Produktion, Recycling, Verschaltung, Zusammensetzung et cetera) unterschiedlich dar. Gleiches ergibt sich für die Komponenten wie Wechselstromrichter, Aufständerung und Speicher. Wenngleich zur Beschreibung der Notwendigkeit und des Zusammenspiels der einzelnen Komponenten in einer Solaranlage Werke wie „Photovoltaic Solar Energy Generation“ [Goetzberger und Hoffmann 2010, S. 95ff] sowie „Photovoltaik“ [Mertens 2011, S. 147ff] ausreichen, ergibt sich in der Literatur speziell über Solarzellen, -module und -anlagen ein inhomogenes Bild. Die Beschreibung aller Systemkomponenten und die dabei gewählte Tiefe sind sehr unterschiedlich verteilt. Dies zeigt der Vergleich der Werke [Schmidt 2002], [Goetzberger und Hoffmann 2010], [Mertens 2011] sowie [Fraas und Partain 2010, S. 129ff]. So gibt [Schmidt 2002] mit „Regenerative Energien in der Praxis“ ab Seite 135 einen kurzen und deutlichen Einblick in die Thematik. Im Gegensatz dazu vertiefen [Goetzberger und Hoffmann 2010] sowie [Mertens 2011] auf den zugehörigen und eben genannten Seiten die Funktionsweise und Zusammensetzung aller Systemkomponenten. Sie widmen den Systemkomponenten jeweils mindestens ein Kapitel. Dabei treffen sie verschiedene Unterteilungen nach Inselanlagen und netzgekoppelten Anlagen sowie bezüglich verschiedener Anwendungsfälle. Hauptsächlich thematisieren sie jedoch Fragestellungen wie die optimale Verschaltung, Ausrichtung und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten. [Mertens 2011] geht allerdings als einzige der genannten Schriften ein Stück weiter und beschreibt die notwendige Gleichstromverkabelung. Zum Vergleich werden im Buch „Solar Cells and Their Applications“ [Fraas und Partain 2010] die einzelnen Anlagenteile neben den Solarmodulen nicht betrachtet.

Werden die einzelnen Anlagenkomponenten bezüglich ihrer Notwendigkeit und ihres Zusammenspiels in den meisten Werken noch thematisiert, so fehlt jedoch jedwede Betrachtung zu deren Produktions- und Recyclingprozessen. Für die Themen Produktion und Recycling der einzelnen Anlagenkomponenten wird deshalb auf die folgenden Unterkapitel 1.3.4 und 1.3.5 verwiesen. Für nähere Untersuchungen eignet sich nur spezielle Literatur über beispielsweise Wechselrichter beziehungsweise die Datenblätter

zu den einzelnen Anlagenkomponenten. Hinsichtlich der verwendeten chemischen Elemente und Bauteile unterscheiden sich die Anlagenkomponenten in ihren Klassen stark, was keine allgemein gültigen Aussagen zulässt. Da das Portfolio aller Anlagenkomponenten sehr breit aufgestellt ist, können bei speziellen Fragestellungen indessen nur die Produzenten selbst Auskunft geben.

1.3.4 Produktionstechnologien

Bei der verfügbaren Literatur zu den Produktionsprozessen rund um eine Solaranlage ergibt sich ein ähnliches Bild wie für die verfügbare Literatur zur Funktionsweise. Wenngleich für die Produktion des Grundstoffes Silizium und anderer Halbleitermaterialen sowie für die Produktion der unterschiedlichen Solarzellenkonzepte reichlich Literatur vorhanden ist, fehlt sie weitestgehend für alle anderen Anlagenkomponenten. Grund hierfür ist die Konzentration der Forschung auf die Zelle und das damit verbundene Wettrennen um höhere Wirkungsgrade bei niedrigeren Produktionskosten. Zudem muss bei der Literatur zur Modul-, Zellen- und Halbleitermaterialherstellung zwischen der rein verfahrenstechnischen Perspektive und einer energie- und kostenanalysierenden Betrachtung unterschieden werden.

Die verfahrenstechnische Perspektive wird in der gängigen Literatur sehr gut abgedeckt. Selbst in unspezifischer Literatur über die verschiedenen Solarzellenkonzepte finden sich Anhaltspunkte zu den verfahrenstechnischen Grundzügen in der Produktion. So beschreiben sogar Grundlagenbücher wie [Mertens 2011] mit „Photovoltaik“ ab Seite 113 und [Kaltschmitt und Streicher 2005a, S. 214ff] mit „Erneuerbare Energien“ elementare Verfahren zur Produktion von Solar-Grade-Silizium und der sich anschließenden Produktionsschritte wie das Czochralski-, das Float-Zone-, das Edge-Defined-Film-Growth- und das String-Ribbon-Verfahren. Wenngleich für die verfahrenstechnische Betrachtung neben der allgemeinen Literatur zur Photovoltaik (bspw.: [Fraas und Partain 2010]) auch Paper und wissenschaftliche Arbeiten über spezielle Zellendesigns wie [Zechner 1999] zur Verfügung stehen, finden sich ebenfalls detaillierte Angaben in Broschüren von Herstellern kristalliner Siliziumrohwafer. Exemplarisch sollen hier die Broschüren des Herstellers MicroChemicals wie zum Beispiel „Silizium Wafer“ aufgeführt sein [MicroChemicals GmbH 2012].

Die ökonomische und energetische Betrachtung erweist sich hingegen als problematisch. Wirtschaftlichkeitsanalysen beziehen sich meist auf die Energierücklaufzeit und sind für detaillierte Aussagen zur Produktion zu oberflächlich. Die ökonomische und energetische Betrachtung der Produktionsprozesse findet in der gängigen Literatur über die Technologie der Photovoltaik in toto kaum statt. Für detaillierte Angaben eignen sich fast nur Zeitschriftenartikel wie beispielshalber „Mehrfache Ernte“ [Bernreuter 2002] in der solarspezifischen Zeitschrift Photon und sehr spezielle Literatur. Eine diesbezüglich umfassende Betrachtung bietet jedoch zum Beispiel [Jungbluth *et al.* 2012] mit „Life Cycle Inventories of Photovoltaics“.

Bei der Solarzellenproduktion ist zwischen der Produktion von Wirkungsgradrekordzellen aus dem Labor und ihren kommerziellen Ablegern zu unterscheiden. Wenngleich die verfahrenstechnische Beschreibung der Produktionsschritte der verschiedenen Laborzellen in der solarspezifischen Literatur weit verbreitet ist, sind Quellen über die Produktion ihrer kommerziellen Pendants indessen schwer zugänglich, da in der Wirtschaft die Wahrung von Betriebsgeheimnissen für eine kostengünstige Produktion angestrebt wird.

Noch schwieriger gestaltet sich die Suche nach Quellen zu den Produktionsprozessen einer Solaranlage samt Komponenten. Dies bezieht sich vor allem auf die Anlagenbestandteile neben den Solarmodulen. Hier fehlt zugleich die breite Basis einer energetischen und ökonomischen Betrachtung sowie der verfahrenstechnischen Grundzüge. Diese lassen sich aber aus Literatur über andere industrielle Fertigungsbereiche aufarbeiten. Für Wechselrichter existiert weitaus weniger Literatur als für Solarmodule und –zellen. Für eine ökonomische und energetische Betrachtung der Produktionsprozesse eignen sich hier die wissenschaftlichen Texte um De Wild-Scholten wie „A cost and environmental impact comparision of grid-connected rooftop and ground based PV systems“ [De Wild-Scholten *et al.* 2006] sowie spezielle Untersuchungen des National Renewable Energy Laboratory zu Wechselrichtern [West 2003]. Die Betrachtung der Aufständerung geht größtenteils nicht über ihren Verwendungszweck hinaus. Allenfalls werden verschiedene Konzepte benannt und nach Anlagentyp klassifiziert. Aufständerungen und Befestigungen einzelner Solaranlagen unterscheiden sich jedoch stark und sind je nach Anwendungsfall neu auszulegen. Zudem gibt es eine Reihe von Spezialanfertigungen. Die Datendichte für Aufständerung und Verkabelung ist indessen sehr gering. Vereinzelt finden sich Annahmen und Durchschnittswerte wie beispielsweise in

[Jungbluth *et al.* 2012] mit „Life Cycle Inventories of Photovoltaics“ auf den Seiten 95ff. Die Verfügbarkeit der Prozessparameter für die Produktion aller Anlagenkomponenten einer Solaranlage zeigt sich folglich sehr inhomogen. Dies stellt aber keine unüberwindbare Hürde dar, da für die kritischen Anlagenkomponenten wie die Solarmodule Literatur zur Verfügung steht. Auch ist hinsichtlich der Optimierungspotenziale und Einsparmöglichkeiten während der Modulproduktion ein Zuwachs an adäquater Literatur in den kommenden Jahren abzusehen, da die Thematik immer mehr Beachtung in der Wissenschaft findet.

Beispielsweise befasst sich das Fraunhofer ISE mit technologischen Neuerungen von der Halbleiterproduktion bis hin zu neuartigen Ansätzen in der Solaranlagentechnik [Fraunhofer ISE 2012, S. 61ff]. Steigende Erfahrungswerte in den Produktionsprozessen und die Nutzung beziehungsweise der Vergleich mit fortschrittlichen Technologien ermöglichen zudem wissenschaftliche Betrachtungen zur Kostenreduktion, wie in [Bony und Newman 2010]: „Achieving Low-Cost Solar PV“ ab Seite 7 beschrieben.

1.3.5 Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule

In der Literatur sind lediglich erste Ansätze zu den technologischen Grundlagen des PV-Recyclings zu erkennen. Dies ist dem noch sehr jungen Forschungsfeld geschuldet. Wenngleich die technologischen Grundlagen des PV-Recyclings in der bereits aufgeführten Literatur kaum Beachtung finden, wird in den meisten wissenschaftlichen Texten zumindest eine mögliche Notwendigkeit angesprochen. Diese bezieht sich zumeist nur auf das Recycling von Solarzellen und -modulen, da auf ihnen das Hauptaugenmerk liegt. Zusätzlich gilt: „The electronic and electric components of a PV system such as the inverter, batteries, charge controller, and cable can be recycled by existing and proven technologies without any problems. Installation materials [...] usually consist of metal [...], which can be recycled like normal scrap metal” [Goetzberger und Hoffmann 2010, S. 141]. Für Solarzellen und –module beschränkt sich die Beschreibung neben einem möglichen Recycling meistens nur auf eine oberflächliche Prognose der in Zukunft anfallenden Mengen und einer Andeutung möglicher Probleme sowie grobschematische Überlegungen [Goetzberger und Hoffmann 2010, S. 140ff] und Einflüsse auf die Energierücklaufzeit [Mertens 2011, S. 139ff].

Ein anderes Bild ergibt sich bei den Werken [Poortmans und Arkhipov 2006] sowie [Fraas und Partain 2010]. Beide gehen weder auf die Grundlagen noch auf eine mögliche Notwendigkeit noch auf Alternativen ein.

Vielmehr ist auf spezielle Literatur in Form von veröffentlichten Papern oder Artikeln zurückzugreifen. Eine Vielzahl an Publikationen wissenschaftlicher Arbeiten entstanden in den letzten Jahren um Herrn Vasilis Fthenakis. Am Brookhaven National Laboratory leitet er das „National PV Environmental, Health and Safety (EH&S) Research Center" und an der Columbia University gründete und leitet er das „Center for Life Cycle Analysis". Mit dem Teilfokus seines wissenschaftlichen Arbeitens auf PV-Recycling veröffentlichten er und seine Kollegen Publikationen wie: „End-of Life Management and Recycling of PV Modules" [Fthenakis 2000] und „Design and Optimization of Photovoltaics Recycling Infrastructure" [Choi und Fthenakis 2010]. Weiter finden sich Publikationen in Form von wissenschaftlichen Artikeln allgemeiner aber auch sehr spezieller Natur. So veröffentlichte die Zeitschrift „Müll und Abfall" 2012 mit [Friege und Kummer 2012] einen der wenigen deutschsprachigen Artikel. Dieser stellt sehr allgemein gehalten erste Ansätze eines Recyclings dar. Dazu dienen wieder eine Prognose des zukünftigen Altmodulaufkommens und eine knappe Beschreibung der Zusammensetzung einer PV-Zelle als Basis. Zudem finden sich im Artikel erste Anhaltspunkte für unternehmerische Aktivitäten.

Seit 2010 ist ein Anstieg der publizierten Artikel rund um das PV-Recycling zu beobachten. Dieser Trend gilt sowohl für allgemeine Betrachtungen als auch für spezielle Problemstellungen. Exemplarisch seien hier die Artikel um Max Marwede wie: „Recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste – current feasible processes" [Marwede *et al.* 2013] und aus China [Li *et al.* 2013] mit „Regional or global WEEE recycling. Where to go?" aufgeführt.

Abfallrechtliche Texte wie die WEEE-Richtlinie (Waste Electrical and Electronic Equipment) und die Abfallrahmenrichtlinie geben zwar die rechtlichen Rahmenbedingungen vor, eignen sich aber nicht für eine detaillierte Beschreibung der verfahrenstechnischen Parameter oder für eine ökonomische und energetische Auswertung.

Erste Ansätze eines möglichen Recyclings sind aber auch Forschungsberichten wie [Sander *et al.* 2004]: "Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung" sowie [Behrendt *et al.* 2010] mit „Ressourceneffiziente Photovoltaik

2020+“ zu entnehmen. Darüber hinaus sind als mögliche Quellen neben der gängigen Literatur auch Veröffentlichungen von Firmen wie Saperatec, Loser Chemie, Lobbe (beispielshalber [Lobbe 2012]) und FirstSolar sehr aufschlussreich, da die Informationen direkt an die Erfahrungen der Recycler geknüpft sind.

Durch ein steigendes Interesse der Wissenschaft und der Wirtschaft am Thema PV-Recycling entsteht allmählich eine Wissensbasis. Mit dem steigenden Interesse der Wirtschaft entstehen zudem erste Erfahrungen mit PV-spezifischen Recycling-technologien. Darauf aufbauend gibt es auch erste Überlegungen und energetische Vergleiche für eine produktionsinterne Rückführung [Odden *et al.* 2008].

Erste ernstzunehmende Vergleiche und verfahrenstechnische Überblicke bestehender und sich in der Entwicklung befindender Recyclingtechnologien gibt [Sander *et al.* 2007] in: „Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystem für photovoltaische Produkte“. Neben der Prognose des Abfallaufkommens und der Darstellung des grund-legenden Aufbaus der verschiedenen PV-Zellen sind sowohl rechtliche, ökobilanzielle und transportlogistische Aspekte als auch mögliche Verwertungsprozesse und –techniken Diskussionsgegenstand. Die Studie stellt damit eine der wenigen, in deutscher Sprache verfügbaren, thematisch umfassenden Betrachtungen dar.

1.3.6 Zusammenfassung und weitere Aspekte

Die Verfügbarkeit geeigneter Literatur zu den beschriebenen Aspekten rund um die technologischen Grundlagen eines möglichen PV-Recyclings gestaltet sich inhomogen; mit steigender Themenspezialisierung sinkt die Quantität qualitativ hochwertiger Quellen. Literatur über Halbleiter, den pn-Übergang et cetera ist in Fülle verfügbar, da diese Grundlagenthematiken für weitere technologisch wichtige Bereiche wie beispiels-weise Transistoren essentiell sind. Ein anderes Bild ergibt sich bereits auf der nächsten Stufe, da es sich dabei um einen speziellen Bereich der Halbleiteranwendung handelt: die technologischen Grundlagen der Solarzelle und der Solaranlage. Wenngleich sich die Verfügbarkeit der Literatur zu den verschiedenen Zellenkonzepten als akzeptabel herausstellt, offenbart diese sich für alle anderen Anlagenkomponenten als mäßig. Drastischer zeigt sich die Existenz adäquater Literatur zu den Produktionsprozessen aller Anlagenkomponenten. Für die Herstellung der benötigten Halbleitermaterialien und die

Produktionsschritte der meisten Laborzellenkonzepte ist die Datendichte annehmbar, für alle anderen Aspekte hingegen inakzeptabel. Zur Thematik des PV-Recyclings ist kaum Literatur verfügbar - allenfalls spezielle wissenschaftliche Artikel und Forschungsberichte sowie Publikationen ausgewählter Wissenschaftler. Obwohl in den letzten Jahren ein Zuwachs angemessener Literatur zu verzeichnen ist, stellt sich für diese spezielle Thematik ein erheblicher Nachholbedarf an Publikationen und Fachliteratur heraus.

Zudem beinhalten einige der verfügbaren Quellen fundamentale Fehler, falsche Annahmen oder beziehen sich auf fehlerhafte Literatur. An dieser Stelle seien beispielshalber [Latunussa *et al.* 2016], [Cucchiella *et al.* 2015], [Choi und Fthenakis 2014] sowie [Fthenakis 2000] vorab aufgeführt, welche an gegebener Stelle in dieser Arbeit nochmals gezielt diskutiert werden. Dies stellt sich vor allem in dem Fall als besonders prekär dar, in dem es sich um Grundlagendaten handelt und der ursprüngliche Fehler nicht der direkten Bezugsquelle entstammt. Die für das Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule bisweilen als ungenügend identifizierte Quantität verfügbarer Literatur wird so weiter auf ein Minimum qualitativ adäquater Quellen limitiert.

Hinzu kommt die gewünschte Thematik der Regionalisierung. Neben statistischen Zusammenfassungen der regionalen Installationshistorie mangelt es in der Literatur gleichwohl an speziellen Fragestellungen regionaler Wertschöpfung im Zusammenhang mit dem Recycling von PV-Altmodulen. Als besonders kritisch ist dabei die Absenz jedweder regionalen Abfallprognose für PV-Module zu beurteilen, welche letztlich die Basis einer ökonomischen Betrachtung spezieller Recyclingprozesse bildet. Weiter zeigt sich deutlich, dass sich selbst die vorhandenen Schätzungen respektive etwaige Modelle für die Berechnung von zukünftigen annuellen Altmodulströmen auf nationaler, europäischer gar mondialer Ebene als qualitativ unzureichend und mitunter als fragwürdig erweisen. Die überwiegende Menge der verschiedenen Quellen etwaiger Altmodulschätzungen simplifiziert die Prognose auf die Annahme, dass alle Photovoltaikmodule gesamtheitlich 20 Jahre nach deren Installation in Form eines Dirac-Impulses als Altmodule anfallen. Dies stellt eine völlig inakzeptable Annahme dar. Zudem werden weder Ursachen, Defektwahrscheinlichkeiten und deren Ausprägung in Abhängigkeit der Installationshistorie noch sonstige (auch längst bekannte) technologiespezifische Aspekte und Effekte beachtet.

1.4 Bestätigung der Forschungslücke und Methodik

Den bisherigen Ausführungen inklusive der Literaturanalyse auf technischer Ebene folgend, ist insbesondere die Absenz einer begründeten und wissenschaftlich fundierten Prädiktion zukünftig zu erwartender Altmodulströme – sowohl technologiespezifisch als auch regional eingegrenzt – höchlich kritisch zu bewerten. Der Großteil der ökonomischen und der ökologischen Untersuchungen, Bewertungen sowie Schlussfolgerungen setzt die Existenz eines qualitativ hochwertigen Prognosemodells als substanzielle Datenbasis voraus. Obzwar einfachste „Modelle“ gesamttechnologisch existieren, reichen diese in ihrer Qualität nicht aus, um eine wissenschaftliche Diskussion zu begleiten. Wie im letzten Absatz des direkt vorangehenden Kapitels angeführt, vereinfacht eine Vielzahl der Ansätze die Parameter so stark, dass eine sinnvolle Schätzung des Altmodulaufkommens nicht gewährleistet ist. Dies schränkt nicht nur die Aussagekraft und die Evidenz etwaiger darauf aufbauender Untersuchungen eines Recyclings unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten enorm ein, in der Konsequenz wird eine qualitativ adäquate Analyse ökonomischer Aspekte gar verhindert.

Gleichwohl ist die Beantwortung der zentralen Fragestellungen zur gegenwärtigen Disproportionalität zwischen dem Stand der zur Verfügung stehenden hochwertigen verfahrenstechnischen Lösungsansätze und deren industriellen Anwendung sowie sich daraus potenziell ergebender regionaler Effekte bislang offen und wurde in der wissenschaftlichen Literatur, wenn überhaupt, nur unzureichend sowie lückenhaft diskutiert. Dies begreift sowohl die Untersuchung der Existenz etwaiger Hemmnisfaktoren als auch die Adressierung möglicher Chancen und Risiken ein, die mit einer Etablierung hochwertiger Recyclingstrukturen verbunden sein können. Weiter sind die Auswirkungen zukünftiger Marktverschiebungen sowie technologiespezifisch zu erwartender Anpassungen der Zusammensetzung der Photovoltaikmodule und der Solarzellen bisher ungeklärt.

Mit der steten Weiterentwicklung der gesamten Photovoltaik, insbesondere jedoch der Produktion infolge kostengetriebener Anreize, als auch der anhaltenden Generierung von Erfahrungswerten aus der konkreten terrestrischen Applikation der Technologie und des steigenden Forschungsinteresses ist auch das gesamte Datenumfeld einem ständigen Wandel unterzogen. Dieserhalb wurde sowohl für die Verfügbarkeit und die Gültigkeit der benötigten Grundlagendaten als auch für die Auswertung etwaiger

externer Statistiken der November 2015 als „Stichtag“ festgelegt. Einzelne Quellen, wie schriftliche Mitteilungen, Gespräche oder spezielle Veröffentlichungen, wurden insbesondere im zentralen Kapitel „Recycling“, sofern sachdienlich und zielführend, jedoch mitunter auch nachträglich aktualisiert. Sonach können für kritische oder zentrale Diskussionsgegenstände durchaus wissenschaftliche Erkenntnisse, welche nach dem definierten Stichtag datiert sind, ergänzend Anwendung finden.

Grundlage der vorliegenden Arbeit bildet primär eine Literaturanalyse, welche auf zwei Arten erfolgt. Der erste Schritt ist eine quantitative Sichtung verfügbarer Quellen in der Breite, Gesetzestexte implizierend. Daran schließt sich die Identifikation spezifischer Fachliteratur und qualitativ adäquater Quellen an, was einer qualitativen Literaturanalyse gleichkommt. Dies dient vor allem der Bearbeitung der betrachtungsrelevanten Thematik: dem hochwertigen Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule. Da, wie bereits mehrfach angeführt, sich die Datenverfügbarkeit diesbezüglich als insuffizient darstellt und eine Vielzahl fehlerhafter Angaben auf unterschiedlichen Ebenen in der zugehörigen Literatur existieren, werden zur Generierung einer eigenen Datenbasis sowie der Analyse der gegenwärtigen Rahmenbedingungen gezielt Expertengespräche mit einbezogen. Zudem fließen auch neueste Erkenntnisse aus dem Besuch fachspezifischer Konferenzen in die Diskussion einzelner Aspekte ein. An dieser Stelle sind besonders der Besuch der „3rd International Conference on PV Module Recycling“ am 28. Februar 2013 in Rom und der „Intersolar 2014“ vom 03. bis 04. Juni 2014 Juni in München hervorzuheben.

Auf der eigenen Datenbasis aufbauend, welche auch die verschiedensten Ursachen für die Entstehung kristalliner Siliziumsolaraltmodule, die zugrunde liegenden Defektwahrscheinlichkeiten und deren Ausprägung in Abhängigkeit der Installationshistorie sowie weitere technologiespezifische Aspekte und Effekte beachtet, wird anschließend ein wissenschaftlich fundiertes und begründetes Prognosemodell erstellt. Dies dient der technologiespezifischen und regionalen Prädiktion zu erwartender annueller Altmodulströme. Zusammen mit der Kenntnis des substanziellen Modulaufbaus, der vollständigen Durchdringung der zugrunde liegenden Produktionssequenz und dem Nachweis der Inexistenz einer technische Restriktion hinsichtlich eines hochwertigen Recyclings bildet das Prognosemodell die Basis einer ökonomischen Betrachtung auf regionaler Ebene. Diese dient letztlich der Identifikation potenzieller ökonomischer Hemmnisfaktoren. Hierfür wird sich eines finanzmathematischen Entscheidungsinstruments bedient,

welches durch Variation der essenziellen Parameter im sinnvollen Rahmen in stetige Funktionen transformiert wird. Diese Funktionen beschreiben die Abhängigkeit der Break-evens der Nettogegenwartswerte von den jeweiligen Funktionstermen, wodurch sich einzelne wirtschaftliche und regionale Einflussgrößen gezielt variieren lassen und so deren Auswirkungen auf die initiale Investitionsentscheidung überprüft werden können.

Außerdem werden im Sinne einer Sensitivitätsanalyse mögliche Beeinflussungen des finanzmathematischen Entscheidungskriteriums für eine Initialinvestition aus der Technologie selbst heraus untersucht. Dies begreift neben technischen Konstruktionsbedingungen auf Basis wirtschaftlicher Überlegungen sowie der Analyse deren Realisierungswahrscheinlichkeit in der industriellen Anwendung auch sich aus deren möglichem Einsatz potenziell ergebende Risiken und Chancen für speziell ausgerichtete Recycler mit ein. Aus der Kenntnis der Produktionssequenz und der Rahmenparameter einer ökologisch hochwertigen Recyclingaktivität werden zudem die materiellen und energetischen Einsparpotenziale sowie mögliche bilanzielle Mehrbelastungen, die eine Rezyklierung der Sekundärrohstoffe nach sich ziehen kann, abgeleitet und diskutiert – sowohl hinsichtlich eines Recyclings zur Verwendung, eines Recyclings zur Verwertung als auch differenziert nach brancheninternen oder branchenexternen Absatzmärkten. Darüber hinaus erfolgt auch ein Vergleich des Status quo der Altmodulentsorgung und der reinen Neuproduktion mit jenen bereits genannten Recyclingvarianten.

Grundlegend werden so multiple Hemmnisfaktoren auf verschiedenen Ebenen identifiziert (begreift sowohl die technische, die ökonomische und die rechtliche Ebene als auch regionale Rahmenbedingungen ein), welche abschließend zusammengetragen und auf mögliche Wechselwirkungen hin untersucht werden. Zudem wird der weitere Forschungsbedarf, der zum Teil auf den generierten Ergebnissen dieser Arbeit aufbaut, definiert und benannt.

KAPITEL 2

PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Gegenstand dieses Kapitels ist die Erläuterung der allgemeinen physikalischen Grundlagen, denen zum Verständnis der subsekutiven Kapitel teils desiderater Charakter zukommt. Gleichwohl können mithilfe der vermittelten Kenntnisse leichter Zusammenhänge zwischen dem Aufbau der Solarmodule, deren Produktion und den Anforderungen an das Recycling diskutiert und verstanden werden. Dies trifft zuvörderst auf die Wirkungsweise und die physikalischen Gegebenheiten eines pn-Übergangs zu. Aber auch Grundlagen, welche auf den ersten Blick technologiefern erscheinen, werden adressiert. So bedingt beispielshalber das solare Strahlungsspektrum die Art der potenziellen Antireflexionsschichten oder technologiespezifische Merkmale wie Light Trapping. Die physikalischen Grundlagen bilden folglich das essentielle Fundament sowohl der technologischen als auch der darauf aufbauenden ökonomischen Beschreibung des Recyclings von Photovoltaikmodulen.

Kapitelfeingliederung

2.1 HALBLEITER 29
2.1.1 Bändermodell 30
2.1.2 Bereitstellung von Ladungsträgern in Halbleitern 33
2.1.2.1 Eigenleitung 33
2.1.2.2 Störstellenleitung 35
2.1.2.2.1 Störstellenleitung in n-dotierten Halbleitern 36
2.1.2.2.2 Störstellenleitung in p-dotierten Halbleitern 39
2.1.3 Ladungstransport 41
2.1.3.1 Feldströme 41
2.1.3.2 Diffusionsstrom 44
2.1.3.3 Gesamtstrom 45
2.1.4 pn-Übergang und Bildung der Raumladungszone 46
2.2 EXTRATERRESTRISCHE SONNENSTRAHLUNG 50
2.3 VERÄNDERUNG DES SONNENSPEKTRUMS IN DER ERDATMOSPHÄRE 53
2.3.1 Absorption in der Erdatmosphäre 53
2.3.2 Reflexion 55
2.3.3 Rayleigh-Streuung 55
2.3.4 Mie-Streuung 56
2.3.5 Gesamtextinktion 57
2.3.6 Air Mass 58
2.4 GLOBALSTRAHLUNG 61
2.4.1 Modell der Sonnen-Volllaststunden 64
2.4.2 Standardtestbedingungen 65
2.5 LICHTABSORPTION 67
2.5.1 Antireflexionsbeschichtungen 72
2.5.2 Photoeffekt 75

2.1 Halbleiter

Wenngleich das Rutherford-Bohrsche Atommodel durch weitere Forschungsergebnisse und nach dem Standpunkt der modernen Atomphysik nicht als Zustandsrealität, sondern nur als Rechenschema angesehen werden darf, soll es wegen seiner Handhabbarkeit und Anschaulichkeit hier zugrunde gelegt werden. Nach Rutherford und Bohr umkreisen die Elektronen, die auf bestimmten „Elektronenschalen“ liegen, konzentrisch den Atomkern [Weißbach 1999, S. 468f]. „Die Einteilung in die verschiedenen Bahntypen s, p, d und f soll dem unterschiedlichen Energieniveau der Elektronen einer Schale Rechnung tragen.“ [Stapf 1959, S. 585]

Der Schwingungszustand (Energiezustand) eines Elektrons wird durch die vier Quantenzahlen n, l, m und s beschrieben, wobei sich nach dem Ausschließlichkeitsprinzip von Pauli alle Elektronen eines Atoms in mindestens einer Quantenzahl unterscheiden müssen [Weißbach 1999, S. 469]. Elektronen besitzen dabei die Tendenz, zuerst die niedrigsten Energieniveaus zu besetzen. Da ein Quantenzustand eines Energieniveaus nur durch ein Elektron besetzt werden kann, kann die Anzahl der Elektronen je Energieniveau nicht höher sein, als die Anzahl der möglichen Quantenzustände [Cassignol 1966, S. 3].

Nach heutigem Forschungsstand werden Aufenthaltsbereiche statt der definierten Umlaufbahnen genutzt, da sich die Elektronen nach der Heisenberg‘schen Unschärferelation als Ladungswolke darstellen, wobei ihr Ort und ihre Geschwindigkeit nicht genau angegeben werden können [Weißbach 1999, S. 468]. Jedes Atom besitzt eine für sich eigene und spezifische Elektronenkonfiguration, wobei die höchste Schale eines Energieniveauschemas der Periode des jeweiligen Elementes entspricht. Das Energieniveau eines Elektrons steigt mit der Entfernung der Schale vom Atomkern.

Silizium beispielsweise besitzt im Periodensystem der Elemente die Ordnungszahl 14. Laut Definition setzt sich dessen Ladungsträgerzahl damit aus 14 Protonen (positive Ladung) und 14 Elektronen (negative Ladung) zusammen.

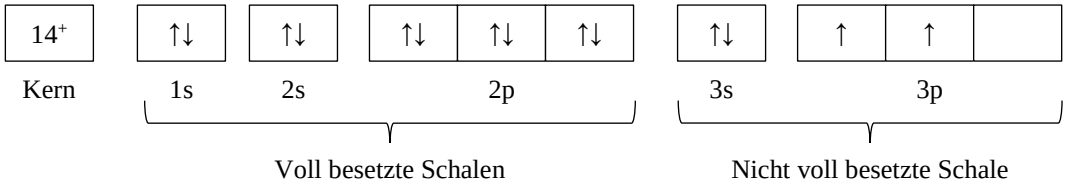


Abbildung 2-1: Silizium in der vereinfachten Pauling-Schreibweise.

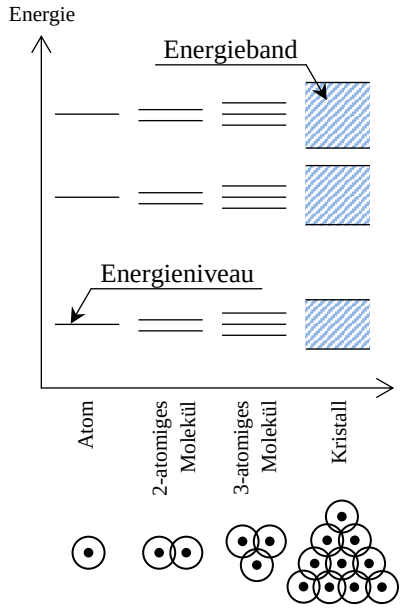


Abbildung 2-2: Energiebänder als elektromagnetische Wechselwirkung von n Energieniveaus.

Im 3s und 3p Orbital können maximal 8 Elektronen „Platz“ finden. Silizium besitzt aber nur 4 Elektronen auf der nicht vollkommenen besetzten äußeren Schale: die so genannten Valenzelektronen. Wird der Abstand zwischen n_A Atomen so weit verringert, dass sie eine elektromagnetische Wechselwirkung untereinander erfahren (Molekülbildung), führt dies zu einer Änderung der Energiezustände. Jedes Energieniveau wird in n Niveaus gespreizt. Die nebenstehende Abbildung 2-2 zeigt dies beispielhaft für die Wechselwirkung von zwei, drei und n Atomen.

Für die Grenzwertbetrachtung der Wechselwirkung unendlich vieler Atome (Atomanzahl $n_A \rightarrow \infty$) werden die Energieniveaus zu quasikontinuierlichen Energiebereichen, sprich Energiebändern zusammengefasst, da einzelne Energieniveaus nicht mehr zu erkennen sind. Dabei entspricht die Zahl der Energieniveaus eines Energiebandes der Anzahl n der in Wechselwirkung stehenden Atome.

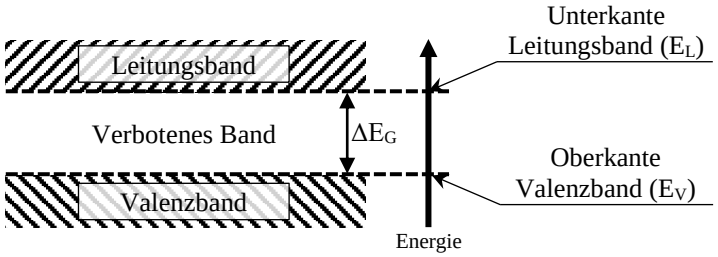
2.1.1 Bändermodell

Bei Atomen werden die Elektronen der jeweils letzten besetzten Schale und damit dem höchsten Energieniveau als Valenzelektronen bezeichnet. Analog verhält es sich mit den Energiebändern bspw. von Kristallen. Unter einem Kristall wird eine feste Bindung von benachbarten Atomen, die einer regelmäßigen Gitterstruktur angehören, verstanden. Dabei gehen die Valenzelektronen der einzelnen Atome eine Wechselwirkung zu den Valenzelektronen der benachbarten Atome mit dem Ziel des Erreichens der Edelgaskonfiguration (voll besetztes Valenzband) ein.

Den stark an die Atomkerne gebundenen Elektronen der inneren Orbitale stehen schmale Energiebänder zur Verfügung, wohingegen den äußeren Elektronen breitere Bänder zur Verfügung stehen. Analog umgekehrt verhält es sich mit den Lücken zwischen den Bändern. Diese Lücken stellen energetisch verbotene Bereiche dar, in denen keine

Energieniveaus existieren. Deshalb werden diese Lücken auch als „verbotene Zonen“ bezeichnet. Jeder Festkörper besitzt eine für ihn charakteristische Breite der Energiebänder und dementsprechend auch unterschiedlich breite Bandabstände. Die elektrische Leitfähigkeit von Festkörpern wird durch die Lage des letzten von Elektronen besetzten Bandes (Valenzband), des ersten nicht von Elektronen besetzten Bandes (Leitungsband) und der Breite der dazwischenliegenden „verbotenen Zone“ bestimmt.

Die inneren Energiebänder von Festkörpern sind vollständig mit Elektronen besetzt. Damit sind die dort befindlichen Elektronen nicht in der Lage sich frei zu bewegen, lediglich ein Platztausch ist möglich [Kaltschmitt und Rau 2005, S. 198]. „Elektrische Leitfähigkeit wird von frei beweglichen Elektronen verursacht.“ [Kuchling 2010, S. 498] Dies ist nur für Elektronen im Valenzband der Fall, wenn diese mithilfe einer Mindestenergiemenge ΔE_G aus dem Valenzband in das Leitungsband befördert werden können. Die Energiemenge ΔE_G (energy gap) ist dabei abhängig von der Breite der Bandlücke, sprich dem inneren Abstand des Leitungsbandes vom Valenzband. Sie wird durch die Differenz des Energieniveaus der unteren Leitungsbandkante E_L und des Energieniveaus der oberen Valenzbandkante E_V definiert und in Elektronenvolt angegeben:



$$\Delta E_G = E_L - E_V$$

Abbildung 2-3: Vereinfachte Darstellung der Energiebänder in einem Kristall.

Die elektrische Leitfähigkeit eines Kristalls ist also von der Breite der Bandlücke abhängig. Ist ΔE_G größer als 1 eV, ist eine Elektronenbewegung bei 0 Kelvin unmöglich, da kein Elektron des Valenzbandes genügend Energie besitzt, um die Lücke zu überwinden. Beim absoluten Nullpunkt würde also ein Isolator vorliegen. Wird die Temperatur des Kristalls erhöht, nehmen die Atome auf den Gitterplätzen Energie auf und die Elektronen beginnen sich durch Wärmeschwingung zu bewegen. [Cassignol 1966, S. 7], [Mertens 2011, S. 63] „Ist die Energie genügend groß, kann die thermische Bewegung zu der Befreiung eines Elektrons aus seiner Bindung führen.“ [Cassignol 1966, S.7] Bezogen auf das Bändermodell bedeutet das, dass die Elektronen die Bandlücke zwischen Valenzband und Leitungsband überwinden und in das Leitungsband gelangen könnten.

Exemplarisch sind die geforderten Mindestenergiemengen ΔE_G (Bandabstände) bei 300 K für einige wichtige Halbleiter in der nachstehenden Tabelle nach [Enderlein und Schenk 1992, S. 23] aufgeführt:

Tabelle 2-1: Bandabstände verschiedener Halbleiter in Elektronenvolt.

Material	Te	Ge	Si	InP	GaAs	CdTe	Se	CdSe	Diamant
ΔE_G [eV]	0,33	0,67	1,12	1,26	1,43	1,44	1,8	1,85	5,5

Die Mindestenergie ΔE_G dient deshalb auch zur Unterscheidung zwischen Isolator, Halbleiter und Leiter. Isolatoren besitzen in der Regel einen sehr großen Abstand zwischen Valenzband und Leitungsband mit $\Delta E_G > 3$ eV. Dieser große Abstand führt dazu, dass es erst bei sehr hohen Temperaturen nur sehr wenigen Valenzelektronen gelingt genügend Energie aufnehmen zu können, um die Bandlücke zu überwinden. Isolatoren besitzen somit praktisch keine freien Elektronen im Leitungsband.

Chemisch reine Halbleiter besitzen einen schmalen Bandabstand (0,1 eV < ΔE_G < 3 eV) [Kaltschmitt und Rau 2005, S. 199] und wirken bei niedrigen Temperaturen deshalb ebenfalls als Isolatoren. Mit steigender Temperatur erhöht sich, wie oben beschrieben, durch die zugeführte Energie die elektrische Leitfähigkeit, was sie bei hohen Temperaturen zu guten Leitern macht.

Bei Metallen kann vereinfacht angenommen werden, dass sie einen Band(abstand) mit $\Delta E_G \leq 0$ eV haben. Es überschneiden sich also das Valenz- und das Leitungsband. Das hat zur Folge, dass Metalle bei tiefen Temperaturen hohe Leitfähigkeiten besitzen, da Valenzelektronen frei in das Leitungsband und zurück wandern können. Aus diesem Grund leiten Metalle selbst nahe 0 Kelvin elektrischen Strom. [Cassignol 1966, S. 6]

Die folgende Abbildung soll die Klassifizierung nochmal verdeutlichen:

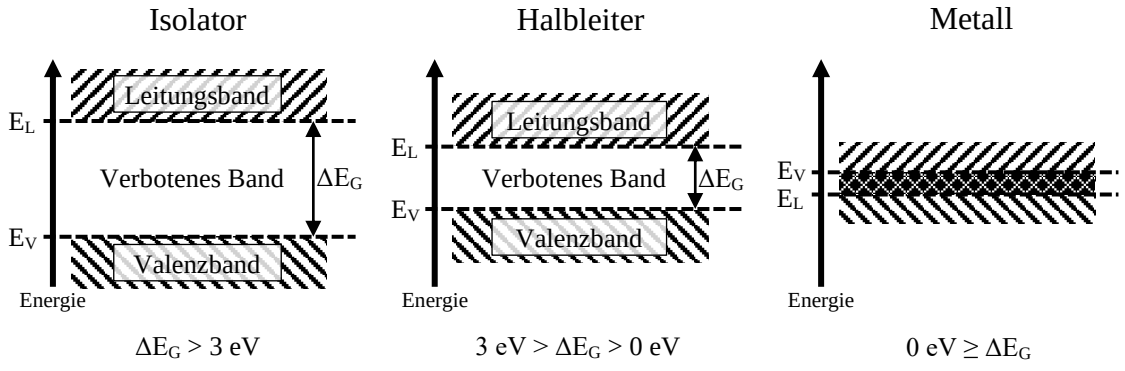
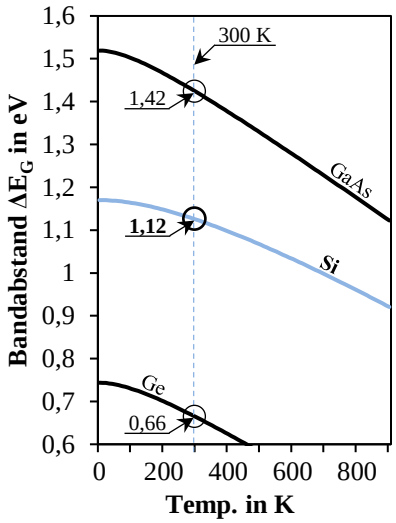


Abbildung 2-4: Vereinfachte Darstellung der Energiebänder von Isolatoren, Halbleitern und Metallen.

Die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit von Halbleitern mit steigender Temperatur ist auf die Abhängigkeit des Bandabstandes vom Temperaturniveau zurückzuführen. Mit steigenden Temperaturen ändert sich der mittlere Abstand zwischen den Atomen des Kristalls und die Elektronen besitzen höhere Schwingungsamplituden (mehr Energie). Dies entspricht einer Verbreiterung der Bänder, womit sich der Bandabstand ΔE_G verkleinert. Nachstehende Abbildung zeigt diesen funktionalen Zusammenhang in Abhängigkeit der Temperatur. Die zugehörige Formel nach [Kamp 2007] und berechnete Einzelwerte finden sich im Anhang 2-1.



		Halbleiter		
		Ge	**Si**	**GaAs**
Temp.	**0 K**	0,743 eV	1,17 eV	1,519 eV
	300 K	0,66 eV	1,12 eV	1,42 eV

Abbildung 2-5: Bandlücke von Ge, Si und GaAs als Funktion der Temperatur mit Wertetabelle.

2.1.2 Bereitstellung von Ladungsträgern in Halbleitern

Grundlegend wird zwischen temperaturbedingten Leitfähigkeitsänderungen und Mechanismen, die von der Reinheit der Kristalle abhängig sind, unterschieden.

2.1.2.1 Eigenleitung

Bei chemisch reinen und ungestörten Kristallen können mit steigender Temperatur Valenzelektronen, wie oben beschrieben, aus dem Valenzband über die Bandlücke hinweg in das Leitungsband gelangen (intrinsische Leitfähigkeit). Löst sich ein Valenzelektron aus seiner Bindung, entsteht an seiner ursprünglichen Stelle im Kristall ein sogenanntes „Loch“, bzw. Defektelektron mit einer dem Elektron entgegengesetzten, aber betragsmäßig gleich großen Ladung. Dieser Vorgang wird als die „Generation eines

Elektron-Loch-Paares“ verstanden und wirkt der sogenannte „Rekombination von Elektronen-Loch-Paaren“ entgegen. Bei der Rekombination von Elektronen-Loch-Paaren springt ein freies Elektron wieder in ein Loch und neutralisiert es damit. [Kaltschmitt und Rau 2005, S. 199] Beide Prozesse, Generation und Rekombination von Elektronen-Loch-Paaren, laufen im Kristall ständig ab. Es stellt sich ein von der Temperatur abhängiges thermodynamisches Gleichgewicht der Elektronen-Loch-Paare ein. Dieses Gleichgewicht wird als Eigenleitungsdichte n_i bezeichnet, wobei der Index i in diesem Zusammenhang für den Fall der intrinsischen Leitfähigkeit benutzt wird. Die Eigenleitungsdichte gibt die mittlere Anzahl an freien Elektronen und Defektelektronen in Abhängigkeit des Materials und der Temperatur an. [Mertens 2011, S. 64]

Mit der hinreichend genauen Annahme, dass die in einem reinen Halbleiterkristall erzeugten freien Elektronen im Leitungsband aus dem Valenzband stammen, kann laut [Grundmann 2006, S. 154] für Temperaturen zwischen 0 und 100 °C die Eigenleitungsdichte n_i mit Hilfe der Zustandsdichten des Valenz- und Leitungsbandes (N_V und N_C) gemäß der nachstehenden Formel berechnet werden:

$$n_i = \sqrt{N_V * N_C} * e^{-\frac{\Delta E_G}{2*k*T}} \qquad \textbf{Formel 2-1}$$

mit N_V: Zustandsdichte Valenzband [cm^{-3}] ΔE_G: Bandabstand [eV]
N_C: Zustandsdichte Leitungsband [cm^{-3}] T: Temperatur [K]
k: Bolzmannkonstante = $8{,}617 \cdot 10^{-5}$ [eV/K]

Bei einer Temperatur von T = 300 K würde sich bspw. für Silizium mit $N_V \approx 1{,}05 \cdot 10^{19}$ cm^{-3} und $N_C \approx 7{,}28 \cdot 10^{19}$ cm^{-3} [Grundmann 2006, S. 155] eine Eigenleitungsdichte von:

$$n_i = \sqrt{1{,}05 * 10^{19}[cm^{-3}] * 7{,}28 * 10^{19}[cm^{-3}]} * e^{\frac{-1{,}12\ [eV]}{2*8{,}617*10^{-5}\left[\frac{eV}{K}\right]*300[K]}} \qquad \textbf{Formel 2-2}$$

$$= \underline{\underline{1{,}08 * 10^{10} cm^{-3}}}$$

ergeben. [Enderlein und Schenk 1992, S. 288] gibt zudem folgende Größenordnungen für die Eigenleitungsdichte weiterer ausgewählter Halbleiter bei T = 300 K an:

Tabelle 2-2: Eigenleitungsdichte verschiedener Halbleiter bei 300 Kelvin.

Material	**GaP**	**InP**	**GaAs**	**Ge**	**InAs**	**InSb**
n_i [cm^{-3}]	2,7	$8{,}2 \cdot 10^6$	$1{,}8 \cdot 10^6$	$2{,}4 \cdot 10^{13}$	$8{,}6 \cdot 10^{14}$	$1{,}6 \cdot 10^{16}$

Da bei der Generation von Elektronen-Loch-Paaren jedes erzeugte freie Elektron ein Defektelektron im Kristallgitter generiert, gibt die Eigenleitungsdichte n_i „sowohl die Anzahl der freien Elektronen als auch die Anzahl der Löcher an.“ [Mertens 2011, S. 65] Es ist folglich:

$$n_i = Anzahl\ freie\ Elektronen/cm^3 = Anzahl\ freie\ Defektelektronen/cm^3$$

Damit ist die Anzahl freier Elektronen und Defektelektronen bezogen auf das Volumen eines chemisch reinen Kristalls von der Temperatur nach der Formel 2-1 abhängig. Daraus folgt ebenfalls, dass mit der Anzahl der freien Ladungsträger auch die elektrische Leitfähigkeit der Halbleiter von der Temperatur abhängig ist.

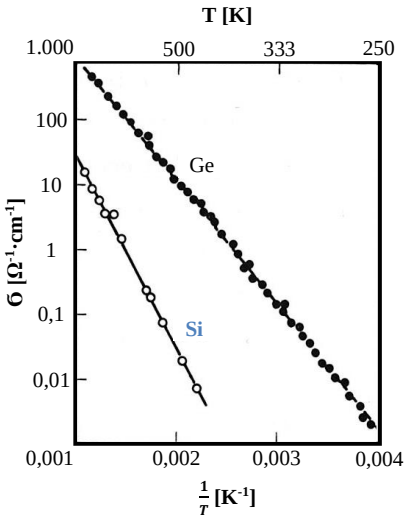


Abbildung 2-6: Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit σ von sehr reinem (eigenleitenden) Ge und Si nach [Enderlein und Schenk 1992, S. 24]

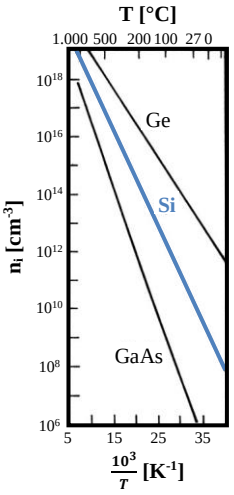


Abbildung 2-7: Eigenleitungskonzentration einiger Halbleiter als Funktion der Temperatur nach [Enderlein und Schenk 1992, S. 229]

2.1.2.2 Störstellenleitung

Zusätzlich zur Eigenleitung kann die elektrische Leitfähigkeit von Kristallen durch chemische Verunreinigung beeinflusst werden. Dazu werden dem Halbleiterkristall gezielt Fremdatome zugefügt. Dieser Vorgang wird als Dotierung bezeichnet. Auswirkungen auf die elektrische Leitfähigkeit des betrachteten Materials besitzen nur „Fremdatome mit einer vom Grundmaterial abweichenden Valenzelektronenzahl.“ [Kaltschmitt und Rau 2005, S. 200]

Je nachdem, ob die Valenzelektronenzahl des Fremdatoms kleiner oder größer der des Originalatoms ist, wird zwischen n- und p-Dotierung, bzw. n- und p-dotierten Halbleitern unterschieden, wobei die Abkürzung n für negativ und p für positiv steht.

2.1.2.2.1 Störstellenleitung in n-dotierten Halbleitern

Im Falle von Siliziumkristallen wird von n-dotierten Halbleitern gesprochen, wenn der Halbleiterkristall mit einem Element der 5. Hauptgruppe (Phosphor, Arsen oder Antimon) „verunreinigt“ wird. Zur Verdeutlichung soll im Folgenden exemplarisch die Dotierung eines Siliziumkristalls mit Arsen betrachtet werden.

Tabelle 2-3: Dotierung eines Siliziumkristalls mit Arsen und die Besetzung der Orbitale.

	Orbital							
	1s	**2s**	**2p**	**3s**	**3p**	**4s**	**3d**	**4p**
Maximal mögliche Elektronenanzahl	2	2	6	2	6	2	10	6
Tatsächliche Elektronenanzahl	2	2	6	2	6	**2**	10	**3**

5 Valenzelektronen

Arsen besitzt 5 Valenzelektronen (Orbital 4s mit 2 Elektronen und Orbital 4p mit 3 Elektronen besetzt) und bringt damit 1 Valenzelektron mehr mit in das Gefüge ein, als im stabilen Zustand für die Siliziumkristallstruktur benötigt wird. Beim Einbringen geringer Mengen von Arsen bildet sich beim Kristallisationsprozess eine Gitterstruktur, in der hin und wieder, mit zufälliger Verteilung, ein Arsenatom an die Stelle eines Siliziumatoms tritt. Typische Dotierungskonzentrationen N_D für n-dotierte Siliziumhalbleiter hängen auch vom Mott-Kriterium ab. Charakteristische Werte liegen laut [Wagemann und Eschrich 2010.] sowie [Wesselak *et al.* 2013] zwischen 10^{19} und 10^{20} cm^{-3}.

Tritt ein Arsenatom in der Gitterstruktur an die Stelle eines Siliziumatoms, gehen vier der fünf Valenzelektronen des Arsens eine kovalente Bindung mit den Nachbaratomen ein. Dieser Vorgang ist in der Abbildung 2-8 verbildlicht.

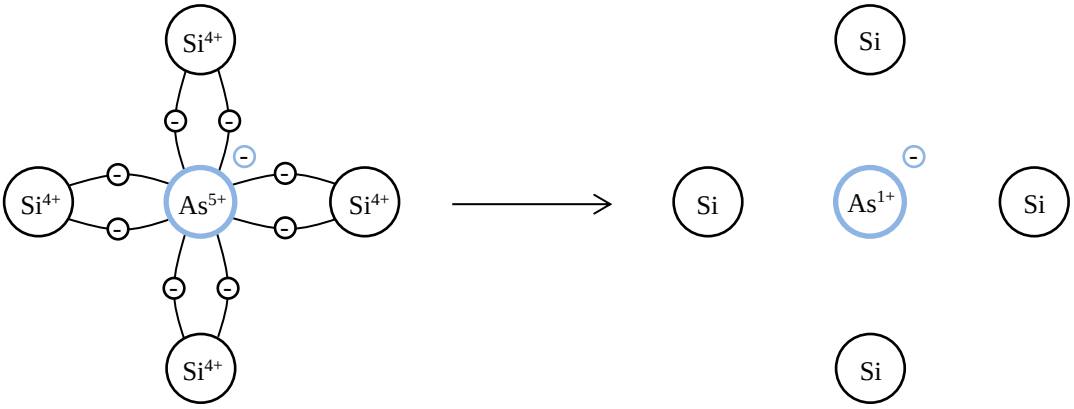


Abbildung 2-8: Arsendotierung eines Siliziumkristalls.

Das überschüssige Elektron ist „[...] nur schwach an die Störstelle gebunden. Es kann sich infolge der thermischen Bewegung des Gitters leicht von der Störstelle lösen und damit als frei bewegliches Elektron die Leitfähigkeit des Kristalls erhöhen. Solche elektronenvermehrende Fremdatome heißen Donatoren.“ [Kaltschmitt und Rau 2005, S. 200]

Durch das Donatoratom wird ein zusätzliches Energieniveau mit geringem Abstand zur Unterkante des Leitungsbandes mit eingebracht. Tabelle 2-4 beinhaltet diese typischen Abstände n-dotierter Halbleiter in Abhängigkeit des gewählten Dotierstoffes bei 300 Kelvin nach [Cassignol 1966, S. 10].

Tabelle 2-4: Abstand der Energieniveaus der Donatoren von der Unterkante des Leitungsbandes in eV.

	Dotiermaterial		
Halbleiter	**P**	**As**	**Sb**
Silizium	0,045 eV	0,05 eV	0,04 eV
Germanium	0,012 eV	0,013 eV	0,01 eV

Am Beispiel des mit Arsen dotierten Siliziumkristalls wird deutlich, dass wesentlich weniger Energie benötigt wird, um das betreffende Elektron ins Leitungsband anzuheben. Im vorliegenden Fall reichen rund 4,5 % der Energie (0,05 eV bezogen auf 1,12 eV) verglichen zum undotierten Silizium. „Bei Raumtemperatur gelangen also die Elektronen der Donatorenniveaus leicht in das Leitungsband.“ [Cassignol 1966, S. 9]

Im Energiebandmodell stellt sich das folgendermaßen dar:

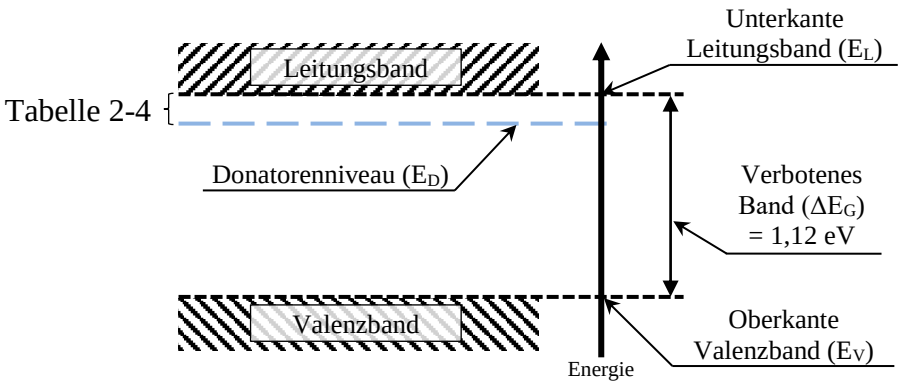


Abbildung 2-9: Vereinfachte Darstellung der Energiebänder bei einer n-Dotierung.

Es werden alle durch Donatoren generiete zusätzliche Quantenzustände auf ein Niveau bezogen: das Donatorenniveau (E_D). Da die Donatorenkonzentration sehr klein ist wird hierbei, im Gegensatz zur Betrachtung des Valenz- oder Leitungsbandes, nur ein Niveau betrachtet. Durch das Einbringen mehrerer Donatoren in das Kristallgefüge entsteht

schließlich in der n-dotierten Schicht ein Elektronenüberschuss. Da Elektronen eine negative Ladung besitzen, wird die Dotierung mit Elektronenüberschuss n-Dotierung (n = negativ) genannt.

Mit dem Elektronenüberschuss und der Zunahme der Dichte der freien Elektronen werden viele offene Bindungen rekombiniert, „[...] so dass kaum noch Löcher vorhanden sind. [...] Die Dichte der freien Elektronen im n-dotierten Halbleiter wird [unter Normalbedingungen – Anm. d. Verf.] praktisch nur durch die Dichte N_D der Donatoratome bestimmt: $n \approx N_D$." [Mertens 2011, S. 68f] Ein weiterer Grund zur Vernachlässigung der Löcherzahl liegt in der um Größenordnungen höheren Konzentration der Elektronen ob der Dotierung (10^{18} verglichen zu $n_i = 10^{10}$).

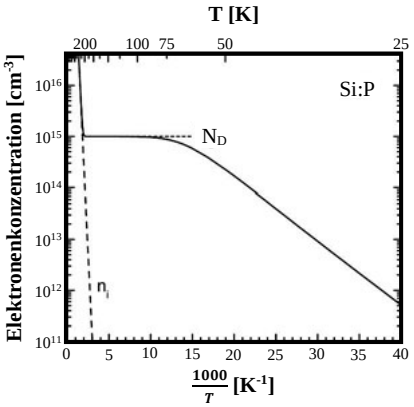


Abbildung 2-10: Ladungsträgerkonzentration Abhängigkeit der Temperatur. Abbildung im Original in [Grundmann 2006, S. 162].

Bei veränderten Bedingungen, wie beispielsweise in Abbildung 2-10 als Erhöhung der Temperatur dargestellt, gelangen ebenfalls Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband (Eigenleitung). Die Dichte der freien Elektronen n_i bestimmt sich dann aus der Summe von Eigen- und Störstellenleitung.

Die Abhängigkeit der Leitfähigkeit eines Siliziumkristalls von beispielsweise der Arsendotierkonzentration bei 300 K ist in nachstehender Abbildung verdeutlicht.

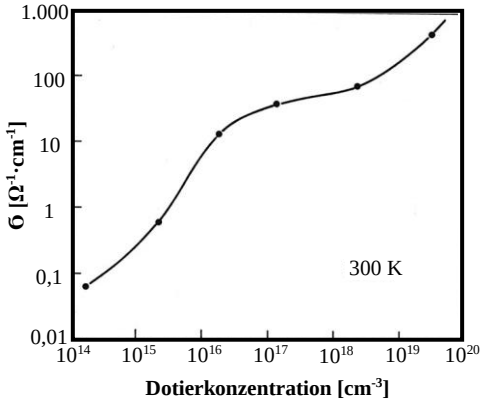


Abbildung 2-11: Abhängigkeit der Leitfähigkeit σ von As-dotierten Si bei T = 300 K von der Arsenkonzentration N_D. Originalabbildung in [Enderlein und Schenk 1992, S. 24].

2.1.2.2.2 Störstellenleitung in p-dotierten Halbleitern

Wird hingegen ein Element der 3 Hauptgruppe (Bor, Aluminium, Gallium, Indium oder Thallium) in das Gitter eingebracht, handelt es sich um eine sogenannte p-dotierte (positiv dotiert) Schicht. Der Einbau von beispielshalber Bor (3 Valenzelektronen) in das Gitter führt dementsprechend zu einem Elektronenmangel. Im Kristallgitter fehlt ein Valenzelektron zur „lückenlosen“ Bindung an den Siliziumatomen, weshalb in diesem Zusammenhang von sogenannten Löchern gesprochen wird.

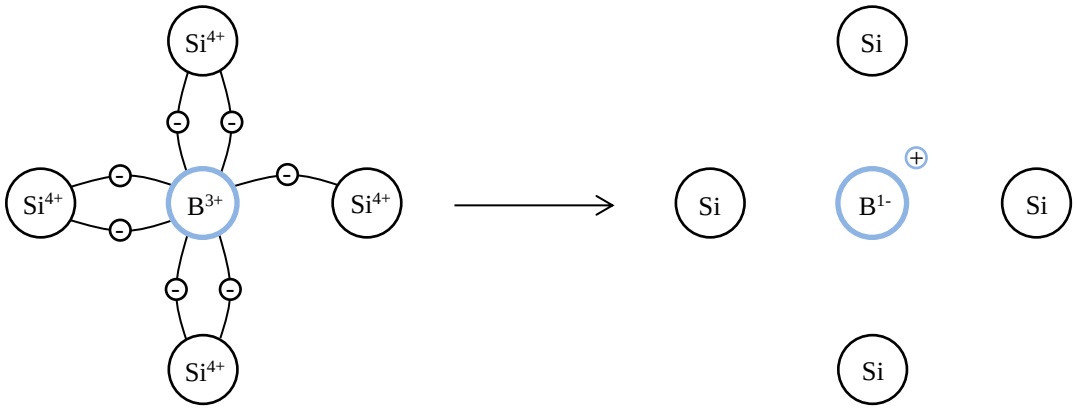


Abbildung 2-12: Bordotierung eines Siliziumkristalls.

Die eingebrachten Dotierstoffe besitzen die Affinität ein Valenzelektron des Grundstoffes aufzunehmen und heißen Akzeptoren [Kaltschmitt und Rau 2005, S. 201]. Wird ein Loch durch ein benachbartes Valenzelektron „gestopft“, entsteht an der ursprünglichen Valenzelektronenstelle erneut ein Loch. Das Loch beginnt zu wandern; es kommt zur Löcherleitung.

Typische Dotierungskonzentrationen N_A sind wie die Donatorkonzentrationen ebenfalls vom Mott-Kriterium abhängig. Typischen Dotierkonzentrationen für p-dotierte Halbleiter liegen laut [Wagemann und Eschrich 2010], [Wesselak *et al.* 2013] und [Chen *et al.* 2016] zwischen 10^{15} und 10^{16} cm^{-3}.

Durch das Akzeptoratom wird ein zusätzliches Energieniveau mit geringem Abstand zur Oberkante des Valenzbandes mit eingebracht. Tabelle 2-5 beinhaltet typische Abstände p-dotierter Halbleiter in Abhängigkeit des gewählten Dotierstoffes bei 300 Kelvin. [Cassignol 1966, S. 10]

Tabelle 2-5: Abstand der Energieniveaus der Akzeptoren von der Oberkante des Valenzbandes in eV.

	Dotiermaterial			
Halbleiter	**B**	**Al**	**Ga**	**In**
Silizium	0,045 eV	0,06 eV	0,07 eV	0,16 eV
Germanium	0,01 eV	0,01 eV	0,01 eV	0,01 eV

Wie aus der Tabelle ersichtlich wird, benötigt ein Elektron aus dem Valenzband nur eine geringe Energie, um in ein Loch auf dem Akzeptorenniveau zu wechseln. Somit braucht im Falle eines mit Bor dotierten Siliziumkristalls ein Valenzelektron nur rund 4 % der Energie (0,045 eV bezogen auf 1,12 eV) im Vergleich zum undotierten Silizium, um aus der festen Stellung im Valenzband auf das Akzeptorenniveau zu entweichen und seinen Platz mit einem Loch zu tauschen. Das so in das Valenzband gelangte Loch trägt dann durch Löcherleitung zur elektrischen Leitfähigkeit bei. Im Energiebandmodell stellt sich das folgendermaßen dar:

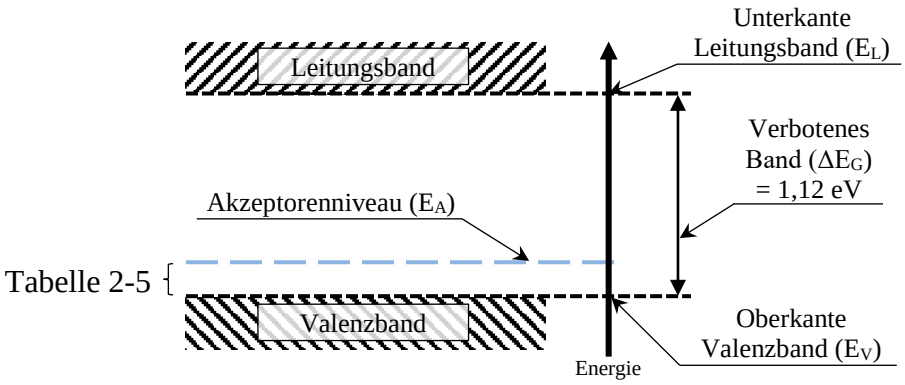


Abbildung 2-13: Vereinfachte Darstellung der Energiebänder bei einer p-Dotierung.

Durch das Einbringen mehrerer Akzeptoren in das Kristallgefüge entsteht in der p-dotierten Schicht ein Elektronenmangel. Die Dichte der Löcher im p-dotierten Halbleiter wird praktisch nur durch die Dichte N_A der Akzeptoratome bestimmt: es gilt $p \approx N_A$.

2.1.3 Ladungstransport

In einem Halbleiter existieren zwei verschiedene Arten des Ladungsträgertransportes. Es wird zwischen einem Feldstrom infolge eines Potenzialgradienten und einem Diffusionsstrom bedingt durch einen Dichtegradienten unterschieden. [Cassignol 1966, S. 25] Dabei ist wichtig, dass jeder Ladungsträgertyp (Elektron, Defektelektron) die Ursache beider Stromarten ist. In diesem Zusammenhang werden zwei neue Sammelbegriffe eingeführt:

- *Majoritätsträger:* freie Elektronen eines n-Halbleiters und Defektelektronen (Löcher) eines p-Halbleiters. Diese stellen im jeweiligen Gebiet die Mehrheit der am Leitungsmechanismus beteiligten Ladungsträger dar.
- *Minoritätsträger:* freie Elektronen eines p-Halbleiters und Defektelektronen (Löcher) eines n-Halbleiters. Diese bilden im jeweiligen Gebiet die Minderheit der am Leitungsmechanismus beteiligten Ladungsträger.

Tabelle 2-6: Zuordnung Majorität- und Minoritätsträger in Abhängigkeit der Dotierung

	Dotierung	
	n-dotiert	**p-dotiert**
Majoritätsträger	Freie Elektronen	Defektelektronen
Minoritätsträger	Defektelektronen	Freie Elektronen

2.1.3.1 Feldströme

Durch thermische Anregung bewegen sich freie Elektronen in einem Siliziumkristall „[…] auf ungeordneten geradlinigen Bahnen, bis ein Zusammenstoß sie in eine andere Richtung ablenkt.“ [Cassignol 1966, S. 25] Wird an einen Siliziumkristall eine elektrische Spannung U angelegt, entsteht im Kristall aufgrund des Potenzialunterschiedes ein elektrisches Feld. Das elektrische Feld wirkt auf die negativ geladenen Elektronen, indem es sie in Richtung des Pluspols der angeschlossenen Spannungsquelle beschleunigt. Es überlagern sich die ungeordnete Bewegung der freien Elektronen und die durch das elektrische Feld hervorgerufene gerichtete Bewegung. Allerdings stellt sich keine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ein, da die freien Elektronen durch Zusammenstöße abgebremst und durch das elektrische Feld wieder beschleunigt werden. Sie erreichen eine über die Zeit gemittelte, von Null verschiedene Geschwindigkeit in Feldrichtung, die sogenannte Leitungsgeschwindigkeit v_L.

Die Beweglichkeit der Ladungsträger (Index *n* steht nachfolgend für Elektronen und Index *u* für Defektelektronen) ist allgemein definiert als deren erreichte mittlere Geschwindigkeit v_L im angelegten elektrischen Feld bezogen auf die vorherrschende Feldstärke E_F:

$$\mu_{n/u} = \frac{v_L}{E_F} \qquad in \left[\frac{cm^2}{V * s}\right] \qquad \textbf{Formel 2-3}$$

Die Ladungsträgerbeweglichkeit „[…] ändert sich mit der Temperatur proportional $T^{-3/2}$." [Cassignol 1966, S. 26] Sie ist somit von der Temperatur abhängig. Je höher die Temperaturen sind, desto stärker sind die Schwingungen des Kristallgitters (akustische Phononen). Durch die Erhöhung der Amplituden der Gitterschwingungen steigt die Wahrscheinlichkeit der Zusammenstöße mit den beschleunigten Elektronen. Die Streuung durch akustische Phononen stellt bei Raumtemperatur die Hauptbehinderung der Beweglichkeit der Ladungsträger dar und äußert sich in der eben benannten temperaturabhängigen Größenordnung. [Grundmann 2006, S. 194]

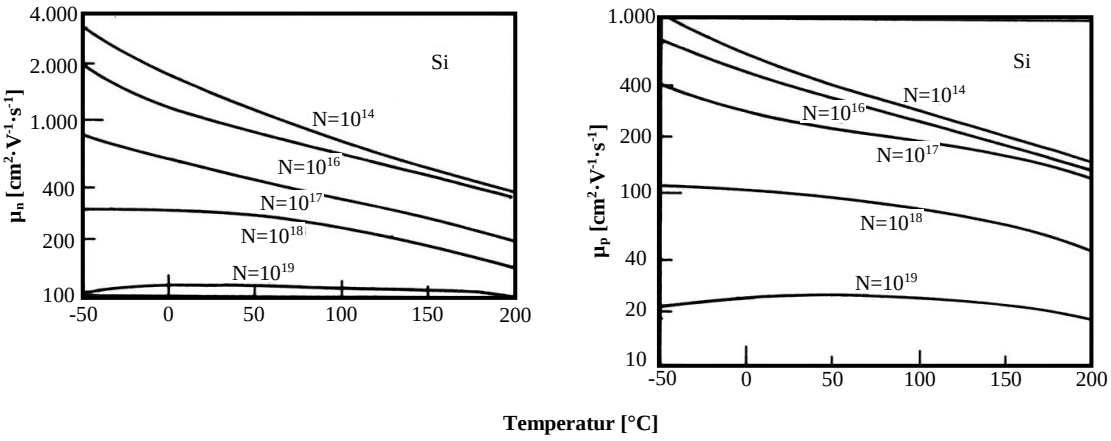


Abbildung 2-14: Temperaturabhängigkeit der Elektronen- und Löcherbeweglichkeit von Silizium für verschiedene Dotierkonzentrationen. Abbildungen nach [Enderlein und Schenk 1992, S. 24].

In einem Kristall mit dem Volumen *V* befindet sich eine freie Elektronenzahl *N* von:

$$N = n * V = n * A * l \qquad \textbf{Formel 2-4}$$

mit n: Ladungsträgerdichte [cm^{-3}] l: betrachtete Länge (Kristalllänge)
A: betrachteter Querschnitt (Kristallquerschnitt)

Bei der mittleren Geschwindigkeit v_L der Elektronen im elektrischen Feld mit der betrachteten Länge *l* werden diese *N* Elektronen laut [Mertens 2011, S. 66] in der Zeitspanne:

$$\Delta t = \frac{l}{v_L}$$ **Formel 2-5**

durch den Kristall transportiert. Wird der Feldstrom, der sich aus dem Quotienten der transportierten Ladung (Anzahl der Elektronen (N) · Ladung (q)) und der betrachteten Zeit berechnet, durch die Querschnittsfläche geteilt, ergibt sich die Feldstromdichte j_F zu:

$$j_F = n * q * v_L$$ **Formel 2-6**

Die spezifische Leitfähigkeit berechnet sich nach:

$$\sigma = \frac{j_F}{E_F}$$ **Formel 2-7**

Durch Einsetzen der Formeln 2-3 und 2-6 in die Formel 2-7 ergeben dich die folgenden Zusammenhänge:

$$\sigma_n = q * n * \mu_n$$ **Formel 2-8**

$$\sigma_u = q * p * \mu_u$$ **Formel 2-9**

Dabei ist die Gesamtleitfähigkeit σ gleich der Summe dieser beiden Einzelleitfähigkeiten σ_n und σ_u. [Enderlein und Schenk 1992, S. 271]

Damit ein Loch wandern kann, müssen nacheinander benachbarte Valenzelektronen in das Loch springen. Dieser Vorgang läuft wesentlich langsamer ab, als die Bewegung freier Elektronen. Laut [Cassignol 1966, S. 26], [Enderlein und Schenk 1992, S. 272] und [Mertens 2011, S. 66] beträgt die Beweglichkeit von Löchern rund einem Drittel der Elektronenbeweglichkeit.

Bei Raumtemperatur beeinflusst die Temperatur die Leitfähigkeit von Halbleitern auf zwei verschiedene Arten. Zum einen bewirkt Sie eine Änderung der für die Leitung zur Verfügung stehenden Ladungsträgeranzahl (vgl. Formel 2-1). Zum anderen wirkt sie auf die Beweglichkeit der Elektronen und damit direkt auf die Leitfähigkeit des Kristalls durch den Zusammenhang nach Formel 2-8 und 2-9 in Verbindung mit Formel 2-3 und ihrer beschriebenen Temperaturabhängigkeit. Im Gesamteffekt bewirkt eine Temperatursteigerung eine Steigerung der Leitfähigkeit (vgl. Abbildung 2-6), da vor allem bei Silizium mit Standarddotierungen die intrinsische Leitfähigkeitsänderung den Haupteffekt darstellt.

2.1.3.2 Diffusionsstrom

Liegt in einem Festkörper ein Gradient infolge eines Dichteunterschiedes vor, versucht dieser durch Diffusion den Zustand minimaler innerer Energie einzunehmen [Weiß *et al.* 1993, S. 44]. Der Diffusionsstrom sorgt folglich für den Ausgleich der Konzentrationsunterschiede in einem geschlossenen Bilanzgebiet (bspw. von Ladungsträgern). „Die Diffusion findet stets in einer Phase statt." [Weiß *et al.* 1993, S. 28] Das von Fick empirisch ermittelte Gesetz der Diffusion in x-Richtung lautet allgemein:

$$\dot{N}_i = -DA\frac{dc_i}{dx} \qquad \textbf{Formel 2-10}$$

Wobei der durch die Diffusion transportierte Stoffstrom proportional dem Diffusionskoeffizienten D in m²/s, der Fläche A senkrecht zur Übertragungsrichtung x und dem Konzentrationsgradienten dc_i/dx ist. [Weiß *et al.* 1993, S. 28] Der Konzentrationsunterschied und damit der durch Diffusion hervorgerufene Stofftransport in Halbleitern beschränkt sich dabei auf freie Ladungsträger, da die Atome fest in der Kristallstruktur verankert sind. Der Mechanismus des Ladungsträgertransportes folgt dabei den bereits beschriebenen Vorgängen. Am Beispiel der Defektelektronen resultiert der Ausgleich der Konzentration aus sprungförmigen Platzwechselvorgängen.

Liegt folglich in einem Halbleiter ein örtlicher Ladungsträgerkonzentrationsunterschied vor, wird dieser durch Diffusion ausgeglichen, bis die Ladungsträgerdichte gleichmäßig verteilt ist. Die dafür notwendige Energie liefert die thermische Gitterbewegung. [Mertens 2011, S. 67] Um die nachfolgenden Betrachtungen zu vereinfachen, wird die Schreibweise des Diffusionsstromes an die der Formel 2-6 angeglichen. Der Diffusionsstrom für Ladungsträger in einem Halbleiter infolge von inhomogenen Ladungsträgerkonzentrationen ist:

$$j_n = D_n q\frac{dn}{dx} \qquad \textbf{Formel 2-11}$$

$$j_u = -D_u q\frac{dp}{dx} \qquad \textbf{Formel 2-12}$$

mit $j_{n/u}$: Diffusionsstromdichte $\frac{dn}{dx}$: Konzentrationsgradient Elektronen

D: Diffusionskoeffizient $\frac{dp}{dx}$: Konzentrationsgradient Defektelektronen

Index n für Elektron und Index u für Defektelektron

Das negative Vorzeichen der Formel 2-11 entfällt, da eine negative Ladung einzusetzen ist und der Diffusionsstrom ohne äußeren Einfluss von Gebieten hoher Konzentration zu Gebieten niedrigerer Konzentration gerichtet ist.

2.1.3.3 Gesamtstrom

Die beiden beschriebenen Ladungsträgertransportmechanismen können unter der Annahme, dass sie voneinander unabhängig sind, zu einem Gesamtstrom j_G zusammengefasst werden [Sze und Ng 2007, S. 62].

$$j_{G,n} = q * n * \mu_n * E_F + D_n q \frac{dn}{dx} \qquad \textbf{Formel 2-13}$$

$$j_{G,u} = q * p * \mu_u * E_F - D_u q \frac{dp}{dx} \qquad \textbf{Formel 2-14}$$

Der jeweils erste Term der Formeln 2-13 und 2-14 stellt den Feldstrom infolge eines Potentialgradienten dar und resultiert aus der Umstellung und dem Einsetzen der Formel 2-3 in die Formel 2-6. Der jeweils zweite Term beider Formeln stellt den eben beschriebenen Diffusionsstrom bedingt durch einen Dichtegradienten dar und ist in den Formeln 2-11 und 2-12 beschrieben. Herrscht in einem Halbleiter thermodynamisches Gleichgewicht, dürfen rein äußerlich keine Ströme fließen ($j_{G,i}$ = 0). Die Formeln 2-13 und 2-14 der Gesamtströme sind Null zu setzen. Das bedeutet allerdings nicht, dass beide Einzelströme verschwinden – Feldstrom und Diffusionsstrom sind dem Betrage nach gleich groß und kompensieren sich damit.

2.1.4 pn-Übergang und Bildung der Raumladungszone

Werden nun p-dotierte und n-dotierte Halbleiter zum Zeitpunkt t_0 in engen Kontakt gebracht, entsteht ein Diffusionsstrom der Majoritätsträger der jeweiligen Dotierung in die jeweils andere Schicht. Die beiden Diffusionsströme sind durch die gegebenen Konzentrationsgradienten und die thermische Eigenbewegung bedingt. Zur Vereinfachung werden die Vorgänge im pn-Übergang nachstehend anhand eines mit Phosphor dotierten Siliziumkristalls (n-dotierte Schicht; im Folgenden mit n-Schicht abgekürzt) und eines mit Bor dotierten Siliziumkristalls (p-dotierte Schicht; im Folgenden mit p-Schicht abgekürzt) veranschaulicht. In der n-Schicht herrscht Elektronenüberschuss und in der p- Schicht Defektelektronenüberschuss (und damit Elektronenmangel).

In Folge der Diffusion kommt es im Übergangsbereich zu einer Verarmung der Majoritätsträger der jeweiligen Schichten. Die Majoritätsträger rekombinieren und jedes freie Elektron der n-dotierten Schicht lässt ein einfach positiv geladenes und fest in das Gitter eingebaute Donatoratom zurück. [Mertens 2011, S. 70]

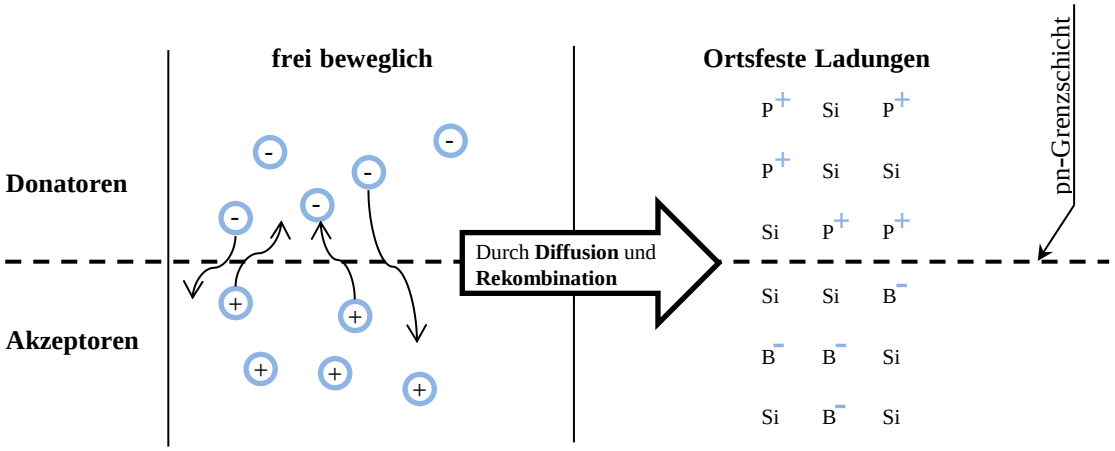


Abbildung 2-15: Bildung der Raumladungszone in einem pn-Übergang (Teil 1).

Infolge der Abgabe eines Valenzelektrons stehen im Donatoratom der n-Schicht den Protonen nicht mehr gleich viele Elektronen gegenüber. Dadurch wird im grenznahen Bereich der n-dotierten Schicht durch die ortsfesten, nicht kompensierten Ladungen eine positive Raumladung erzeugt. Analog gilt dies für die grenznahe p-Schicht. Dort stehen den Protonen mehr Elektronen (negative Ladung) gegenüber, wodurch bei den nicht kompensierten ortsfesten Ladungen eine negative Raumladung erzeugt wird.

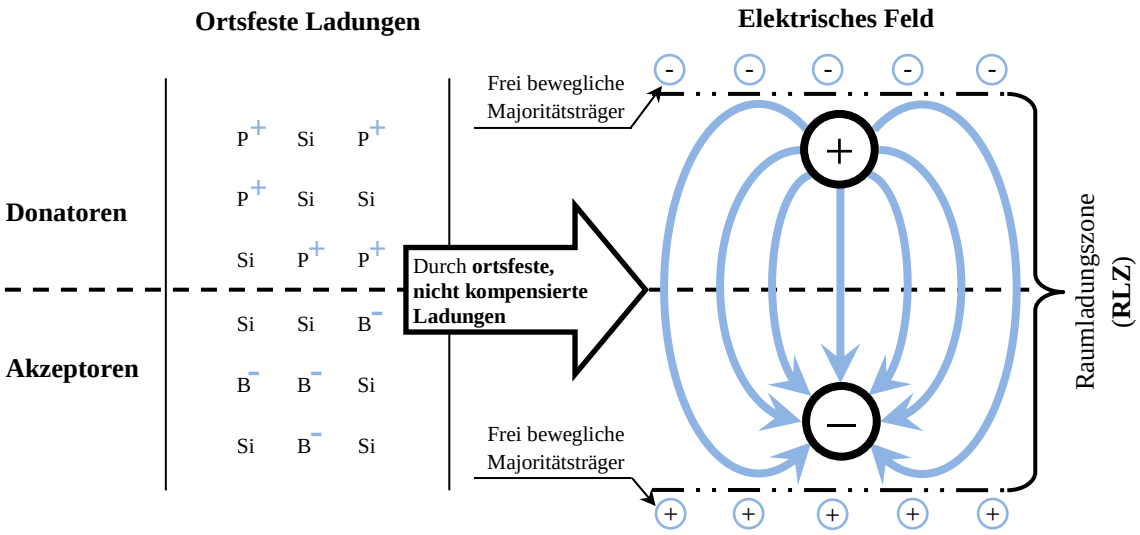


Abbildung 2-16: Bildung der Raumladungszone in einem pn-Übergang (Teil 2).

Durch Rekombination von Löchern und Elektronen bleiben also ortsfeste Ladungen nahe der Grenzschicht zurück. Das sich aus den ortsfesten Ladungen ergebende elektrische Feld wirkt dem Diffusionsstrom entgegen. Diffusionsstrom und elektrisches Feld stellen ein neues, von den Randbedingungen abhängiges thermodynamisches Gleichgewicht her und kompensieren sich zum Zeitpunkt t_1 gegenseitig (vgl. Kapitel 2.1.3.3: Gesamtstrom). Dieser Bereich wird als Raumladungszone definiert. Der in der Raumladungszone entstandene Potentialunterschied wird als Diffusionsspannung U_D bezeichnet, da das elektrische Feld dem Diffusionsstrom entgegenwirkt.

Die Breite der sich ausbildenden Raumladungszone (RLZ) ist von der Dotierungskonzentration und der Temperatur abhängig. Mit steigender Temperatur sinkt die Beweglichkeit der Ladungsträger, wohingegen die Anzahl frei beweglicher Ladungsträger steigt (siehe Kapitel 2.1.2: Bereitstellung von Ladungsträgern in Halbleitern und 2.1.3: Ladungstransport).

In der technischen Nutzung des pn-Übergangs liegt meist keine symmetrische Dotierkonzentration der n- und p-Schicht vor. Im Falle einer doppelt so hohen n-Dotierung (Anzahl der Donatoren in der n-Schicht = 2 · Anzahl der Akzeptoren in der p-Schicht) erstreckt sich die Raumladungszone doppelt so weit in die p-Schicht, als es für die n-Schicht der Fall ist. [Mertens 2011, S. 71] Dies ist durch die unterschiedlich starke Dotierung und der damit bedingten geringeren Konzentration (Anzahl Akzeptoren je cm³) in der p-Schicht begründet.

Diese Behauptung wird durch folgende qualitative Betrachtung substanziiert. Nach [Grundmann 2006, S. 437ff] und [Sze und Ng 2007, S. 80ff] kann die eindimensionale Ausdehnung der Raumladungszone l_{RLZ} in die n- und p-dotierten Gebiete durch folgende Beziehung berechnet werden:

$$l_{RLZ,p-dotiert} = W_{RLZ} \frac{N_D}{N_A + N_D} \qquad \textbf{Formel 2-15}$$

$$l_{RLZ,n-dotiert} = W_{RLZ} \frac{N_A}{N_A + N_D} \qquad \textbf{Formel 2-16}$$

Dabei gibt W_{RLZ} die Gesamtausdehnung der Raumladungszone an. Zur Berechnung der Gesamtausdehnung wird indessen auf [Grundmann 2006] und [Sze und Ng 2007] verwiesen, da dies für eine qualitative Betrachtung nicht benötigt wird. Besitzt ein unsymmetrisch dotierter pn-Übergang eine doppelt so hoch dotierte n-Schicht wie es für die p-Schicht der Fall ist ($N_D = 2 \cdot N_A$), ergibt sich nach den Formeln 2-15 und 2-16 eine Ausbreitung der Raumladungszone zu $l_{RLZ,p\text{-}dotiert} = ⅔ \cdot W_{RLZ}$ und $l_{RLZ,n\text{-}dotiert} = ⅓ \cdot W_{RLZ}$. Für alle Gesamtausdehnungen nimmt die Raumladungszone bei doppelt so hoher n-Dotierung folglich immer doppelt so viel Raum in der p-dotierten Schicht ein. Für charakteristische Dotierkonzentrationen von $N_D = 5 \cdot 10^{18}$ und $N_A = 5 \cdot 10^{16}$ (vgl. Tabelle 3-5, S. 86), also einer um den Faktor 100 höheren n-Dotierung, ergibt sich $l_{RLZ,p\text{-}dotiert}$ zu $0{,}99 \cdot W_{RLZ}$ und $l_{RLZ,n\text{-}dotiert} = 0{,}0099 \cdot W_{RLZ}$. Somit dehnt sich die Raumladungszone bei 100-facher n-Dotierung bezogen auf die p-Dotierung 100-mal soweit in die p-dotierte Schicht aus.

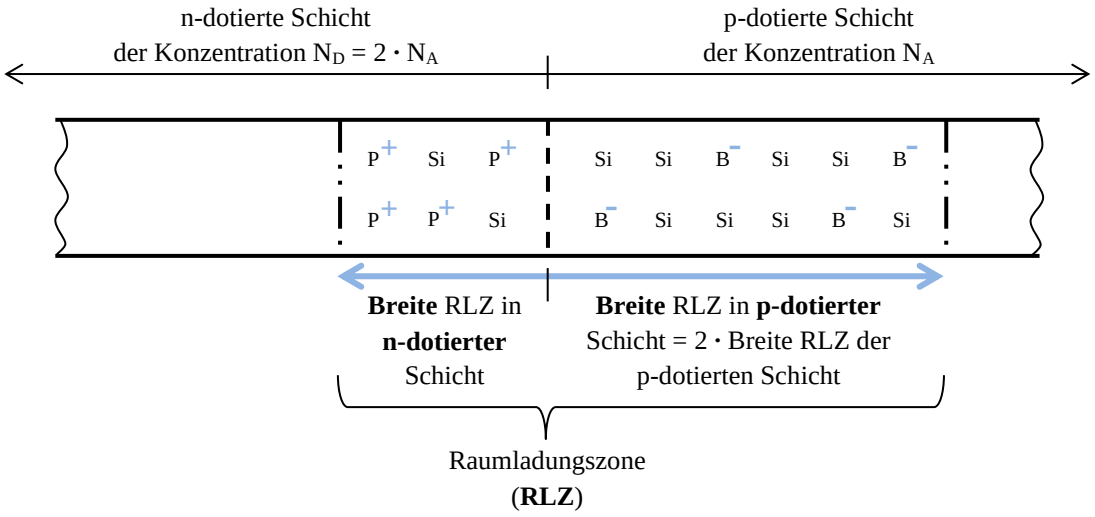


Abbildung 2-17: Unsymmetrische Ausdehnung der Raumladungszone infolge ungleicher Dotierungen des pn-Übergangs.

Die sich ausgebildete Raumladungszone mit der durch Rekombination einhergehenden Verarmung (kaum noch frei bewegliche Ladungen) stellt eine Barriere für die restlichen, frei beweglichen Majoritätsträger der n- und p-Schicht dar.

Sind die Majoritätsträgerdichten N_A (für die n-dotierte Schicht) und N_D (für die p-dotierte Schicht) sowie die Eigenleitungsdichte n_i des Halbleiters bekannt, lässt sich die Diffusionsspannung nach [Cassignol 1966, S. 42] und [Enderlein und Schenk 1992, S. 287] wie folgt berechnen:

$$q * U_D = k * T * \ln\left(\frac{N_A * N_D}{{n_i}^2}\right) \qquad \textbf{Formel 2-17}$$

mit k: Boltzmannkonstante T: Temperatur
Q: Elementarladung U_D: Diffusionsspannung

Der Formel 2-17 nach ist die Diffusionsspannung U_D somit direkt abhängig von:

- der Temperatur,
- dem Dotierungsgrad und
- dem Halbleitermaterial (beeinflusst die Eigenleitungsdichte).

Für einen ungleich dotierten Halbleiter-pn-Übergang aus Silizium mit $N_A = 5{\cdot}10^{16}$ cm^{-3}, $N_D = 5{\cdot}10^{18}$ cm^{-3} und einer Eigenleitungsdichte von $n_i = 10^{10}$ cm^{-3} (vgl. Kapitel 2.1.2.1: Eigenleitung) ergibt sich die Diffusionsspannung bei $T = 300$ K zu:

$$q * U_D = 8{,}617 * 10^{-5}\left[\frac{eV}{K}\right] * 300[K] * \ln\left(\frac{(5 * 10^{16}[cm^{-3}]) * (5 * 10^{18}[cm^{-3}])}{(10^{10}[cm^{-3}])^2}\right)$$
$$= \underline{\underline{0{,}916\ [eV]}} \qquad \textbf{Formel 2-18}$$

Nach der Division durch die Elementarladung beträgt die Diffusionsspannung U_D für das vorliegende Beispiel folglich rund 0,9 V [Mertens 2011, S. 73].

2.2 Extraterrestrische Sonnenstrahlung

Die von der Sonne an den Weltraum abgegebene Strahlung ist das Ergebnis der in ihrem Inneren ablaufenden Kernfusion von Wasserstoff zu Helium. Durch diesen quasi-kontinuierlich ablaufenden Prozess, gibt die Sonne eine resultierende, konstante Strahlungsgesamtleistung von rund $3{,}845 \cdot 10^{26}$ W [Mertens 2011, S. 73] in alle Richtungen ab. „Die Strahlung breitet sich radial in den kosmischen Raum aus." [Hupfer und Kuttler 2006, S. 39] Da sich die Erde in großer Entfernung auf einer elliptischen Bahn um die Sonne bewegt und sie bezogen auf die Entfernung einen sehr kleinen Durchmesser besitzt, erreicht nur ein geringer Teil der von der Sonne abgestrahlten Leistung die Erdoberfläche. Wie später aus der Formel 2-19 ersichtlich wird, nimmt der Strahlungswert mit dem Quadrat der Erdentfernung ab.

Die reale Umlaufbahn der Erde um die Sonne folgt den Keplerschen Gesetzen. Bezogen auf die Planeten unseres Sonnensystems hat das erste Keplersche Gesetz folgenden Inhalt: Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne, wobei sich die Sonne in einem der Brennpunkte der Ellipse befindet. Genau genommen bewegen sich Sonne und Erde um einen gemeinsamen Schwerpunkt. [Kuchling 2010, S. 147] Dieser liegt allerdings innerhalb der Sonne, da die Sonnenmasse viel größer als die Masse der Erde ist. Ob der großen Entfernungen zwischen Sonne und Erde kann die Schwerpunktsverschiebung allerdings vernachlässigt werden.

Das zweite Keplersche Gesetz besagt, dass die Verbindungsgerade Sonne-Planet in gleichen Zeiten die gleichen Flächen überstreicht. Dieses Gesetz folgt damit dem Gesetz der Erhaltung des Drehimpulses. [Kuchling 2010, S. 147] Das hat zur Folge, dass die Bahngeschwindigkeit der Erde mit steigender Entfernung zur Sonne abnimmt. Bezogen auf die nachstehende Abbildung bedeutet das, dass die Erde die Bahn A-B in der gleichen Zeit zurücklegt wie die Bahn C-D. Zur Veranschaulichung sind beide Keplerschen Gesetze in der nachstehenden Abbildung dargestellt.

Fläche A_1 = Fläche A_2

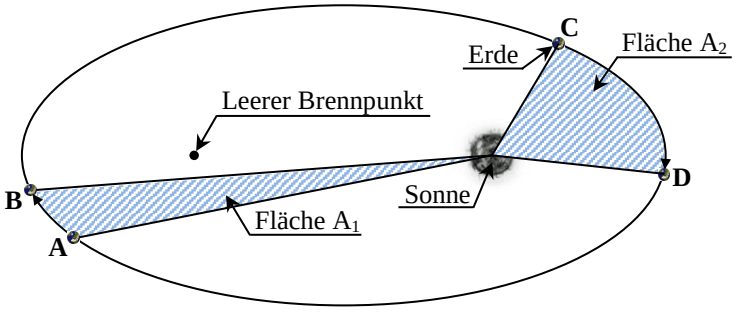


Abbildung 2-18: Erstes und zweites Keplersche Gesetz, nicht Maßstabsgetreu.

Damit die Zusammenhänge einfacher beschrieben werden können, wird die hinreichend genaue Annahme getroffen, dass sich die Erde auf einer Kreisbahn mit einer konstanten Geschwindigkeit um die Sonne bewegt [Wagner 2010, S. 11].

Tabelle 1 stellt nun ein paar wichtige Parameter des Systems Sonne – Erde gegenüber.

Tabelle 2-7: Wichtige Parameter des Systems Sonne – Erde. Daten nach [Becker *et al.* 2000], [Kuchling 2010] und [Mertens 2011].

		Sonne	**Erde**
Parameter	**Mittlerer Radius**	r_S = 696.000 km	r_E = 6.371 km
	Masse	$m_S = 1{,}99 \cdot 10^{30}$ kg	$m_E = 5{,}97 \cdot 10^{24}$ kg
	Oberflächentemperatur	$T_{O,S} \approx$ 6.000 K	$T_{O,E} \approx$ 288 K
	Mittlere Bahngeschwindigkeit	-	$v_{Mittel,E}$ = 29,8 km/s
	Abgestrahlte Leistung	$P_S = 3{,}845 \cdot 10^{26}$ W	-
	Mittlere Entfernung	$r_{E,S} = 149{,}6 \cdot 10^6$ km	

Infolge der großen Entfernung kann die von der Sonne radial abgegebene Strahlung beim Erreichen der Erde als quasiparallel angesehen werden. Zur Berechnung des auf die äußere Erdatmosphäre auftreffenden Anteils der von der Sonne abgestrahlten Leistung E_S müssen die bereits begründeten Annahmen (kreisförmige Umlaufbahn der Erde mit $r_{E,S}$ und parallele Strahlung) Beachtung finden. Wenn die Erde die Sonne auf einer kreisförmigen Umlaufbahn umkreist und die Strahlung der Sonne in alle Richtungen gleich ist, kann zur Berechnung von E_S eine fiktive Hüllkugel mit dem Abstand $r_{E,S}$ um die Sonne gelegt werden. Auf der Oberfläche der fiktiven Hüllkugel hätte die Strahlung damit überall den gleichen Wert.

$$E_S = \frac{Strahlungsgesamtleistung\ der\ Sonne}{Kugeloberfläche} = \frac{P_S}{4 * \pi * r_{E,S}^2}$$

Formel 2-18

$$E_S = \frac{3{,}845 * 10^{26}\ [W]}{4 * \pi * (149{,}6 * 10^6\ [km] * 10^3\ [\frac{m}{km}])^2} = \underline{\underline{1.367{,}17\ \left[\frac{W}{m^2}\right]}}$$

Der berechnete Wert E_S wird auch als Solarkonstante bezeichnet und mit 1.367 W/m² in der Literatur angegeben [Kuchling 2010, S. 265]; [Mertens 2011, S. 38]; [Hupfer und Kuttler 2006, S. 39]. Es ist zu beachten, dass die Solarkonstante nur die Bestrahlungsstärke außerhalb der Erdatmosphäre angibt. Der Wert ist neben der Annahme einer kreisförmigen Umlaufbahn der Erde abhängig von der Strahlungsgesamtleistung der Sonne. Diese unterliegt leichten Schwankungen, die verschiedene Periodizität aufweist.

Die Solarkonstante kann daher laut [Kuchling 2010, S. 265] und [Wagner 2010, S. 5] als ein langjähriger Mittelwert der extraterrestrischen Bestrahlungsstärke aufgefasst werden. Durch die real elliptische Umlaufbahn der Erde unterliegt die Solarkonstante einer täglichen Variation, die im Jahr ≈ 4 % bezogen auf den Mittelwert beträgt [Hupfer und Kuttler 2006, S. 39].

Neben der Berechnung wurde die Solarkonstante auch auf dem experimentellen Weg bestätigt. Das gemessene extraterrestrische Strahlungsspektrum (AM0) der Sonne kann in seinem Verlauf näherungsweise mit dem Spektrum eines schwarzen Strahlers einer Temperatur von 6.000 K verglichen werden (vgl. Abbildung 2-19). Aus Abbildung 2-19 geht auch hervor, dass die Energiemaxima des von der Sonne ausgestrahlten extraterrestrischen Spektrums und des Spektrums eines schwarzen Strahlers einer Temperatur von 6.000 K beide bei rund 490 nm liegen. Der Vergleich der beiden Spektren zeigt, dass sie sich vor allem im langwelligen Bereich ab rund 0,6 µm sehr ähnlich sind.

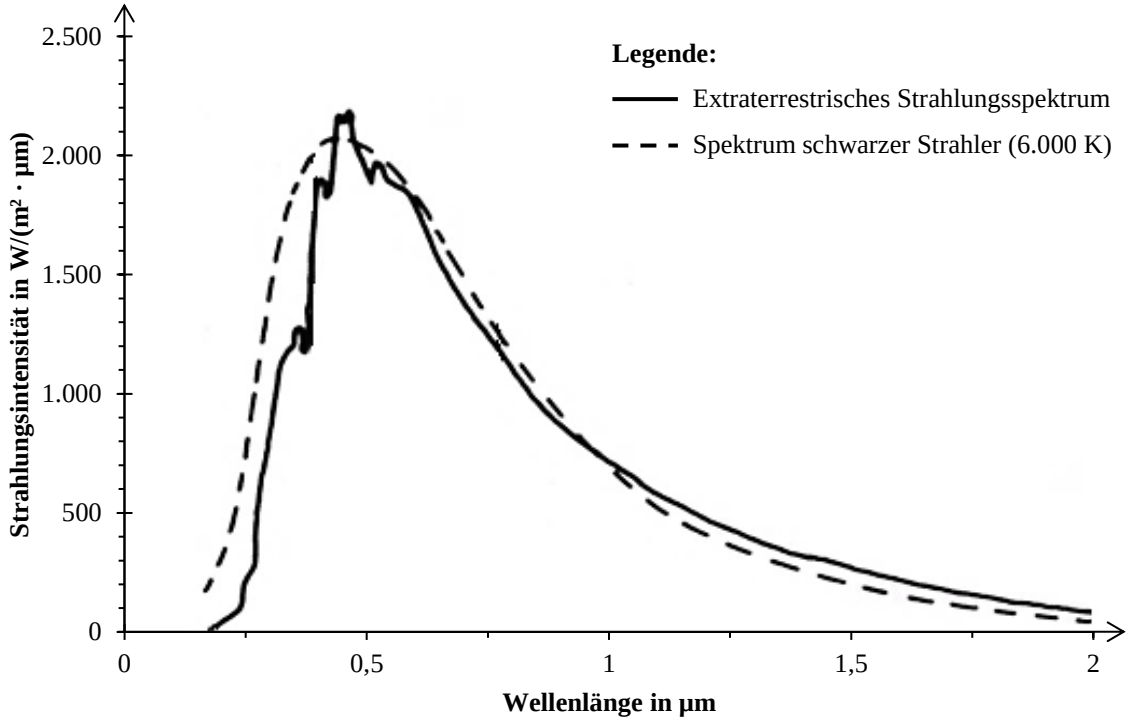


Abbildung 2-19: Extraterrestrisches Strahlungsspektrum und Spektrum eines schwarzen Strahlers einer Temperatur von 6.000 K nach [Liljequist und Cehak 2006, S. 13].

Eine Klassifizierung der Wellenlängen des Sonnenspektrums findet sich im Anhang 2-2. Wird das extraterrestrische Spektrum über alle Wellenlängen integriert, ergibt sich die Solarkonstante E_S ebenfalls zu 1.367 W/m². [Mertens 2011, S. 38]

2.3 Veränderung des Sonnenspektrums in der Erdatmosphäre

Beim Durchgang der Sonnenstrahlung durch die Erdatmosphäre tritt eine Schwächung der Strahlungsintensität ein: die sogenannte Extinktion. Sie hängt hauptsächlich von der betrachteten Wellenlänge und von den in der Atmosphäre vorhandenen Gasarten und Verunreinigungen ab. Die Strahlungsschwächung in der Atmosphäre beruht in toto auf folgenden Phänomenen:

- Absorption
- Reflexion
- Rayleight-Streuung
- Mie-Streuung

2.3.1 Absorption in der Erdatmosphäre

Die von der Sonne abgegebene Strahlung liegt hauptsächlich im Bereich der kurzwelligen Strahlung mit Wellenlängen λ zwischen 200 nm und 2.500 nm (vgl. Abbildung 2-19). In diesem Bereich spielen besonders die Gase Ozon, Kohlendioxid und Wasserdampf eine wichtige Rolle bei der Strahlungsabsorption in der Erdatmosphäre. Ozon absorbiert die von der Sonne abgegebene Strahlung mit der Wellenlänge 200 nm bis 300 nm nahezu komplett [Häckel 2005, S. 185]; [Liljequist und Cehak 2006, S. 15f]. Wie der Übersicht aus Anhang 2-2 zu entnehmen ist, hält Ozon damit vor allem die physiologisch gefährliche Strahlung, bekannt als UV-C und UV-B, zurück. UV-A Strahlung (λ = 315 bis 380 nm) wird durch Ozon kaum beeinflusst. UV-A Strahlung hat auf Grund ihrer hohen Energie (kürzere Wellenlänge als der Bereich des sichtbaren Lichtes) ebenfalls physiologische Wirkungen. Da es in der Atmosphäre kaum absorbiert wird, kann es bspw. Hautrötungen verursachen: den allgemein bekannten Sonnenbrand. An den Bereich der ultravioletten Strahlung schließt sich das Spektrum des für den Menschen sichtbaren Lichtes (380 nm < λ < 780 nm) an. Dieser Bereich wird gemäß des Roggbiv-Schlüssels nach seinen verschiedenen Wellenlängen eingeteilt. Auch dieser Spektralbereich wird von der Erdatmosphäre kaum absorbiert. Wasserdampf tritt ab einer Wellenlänge von rund 700 nm als Absorber in der Erdatmosphäre in Erscheinung. Damit beeinflusst es vordergründig den Bereich des roten sichtbaren Lichtes und den sich anschließenden

infraroten Bereich. Durch Wasserdampf und Kohlendioxid werden erhebliche Strahlungsmengen aus dem infraroten Spektralbereich absorbiert. [Häckel 2005, S. 186] Aber auch Methan und Lachgas sind als Strahlungsabsorber in der Erdatmosphäre nicht zu vernachlässigen. Abbildung 2-20 soll einen Überblick der einzelnen Hauptabsorptionsgase in der Erdatmosphäre und ihrer Gesamtwirkung in Abhängigkeit der Wellenlänge geben.

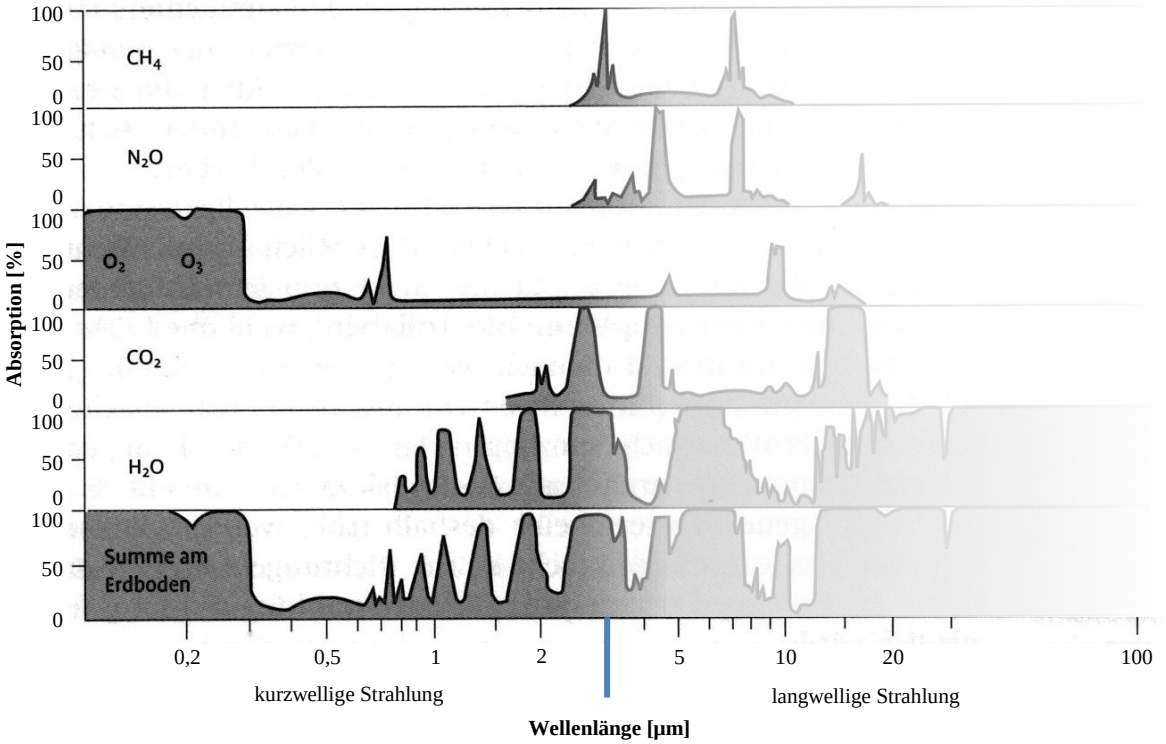


Abbildung 2-20: Hauptabsorptionsgase in der Erdatmosphäre mit den jeweiligen Absorptionswirkungen in Abhängigkeit der Wellenlänge und der Gesamtabsorptionswirkung. Darstellung nach [Häckel 2005, S. 185].

Die Absorptionsintensität ist dabei nicht nur von der Konzentration der Absorptionsgase in der Atmosphäre abhängig, sondern auch von der Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre. Durchläuft die Sonnenstrahlung die Erdatmosphäre nicht senkrecht, sondern schräg, muss die Strahlung einen längeren Weg durch die Atmosphärenschicht bis zur Erdoberfläche zurücklegen. Mit dem längeren Weg erhöht sich das Absorptionspotential, da die Strahlung bei gleicher Absorberkonzentration in der Atmosphäre eine nach dem Satz von Pythagoras fiktiv dickere Atmosphäre durchqueren muss. Nähere Erläuterungen hierzu finden sich im Kapitel 2.3.6: Air Mass.

2.3.2 Reflexion

Die Reflexion der Sonnenstrahlung in der Erdatmosphäre gilt als Sonderfall der Streuung und ist definiert als „[…] eine starke Richtungsänderung der Strahlung nach Auftreffen auf eine Oberfläche.“ [Hupfer und Kuttler 2006, S. 48] Der Reflexionskoeffizient beschreibt das Verhältnis von reflektierter Strahlung zur einfallenden Strahlung. In Prozent ausgedrückt, wird er als Albedo bezeichnet. Wirft folglich eine Oberfläche 50 % der auf sie einfallenden Strahlung zurück, besitzt sie eine Albedo von 50 %. Die Albedo der Erde ist als Quotient „[...] der am oberen Rand der Atmosphäre austretenden reflektierten kurzwelligen Strahlung zur dort im Mittel einfallenden Strahlung definiert.“ [Hupfer und Kuttler 2006, S. 48] In der Erdatmosphäre findet die Reflexion der Strahlung vordergründig an den Wassertröpfchen und Eiskristallen der Wolken statt. So kann die planetarische Albedo der Erde für einen bewölkten Himmel fast doppelt so hoch sein, wie für einen unbewölkten. Tabelle 2-8 enthält Albedowerte in % einiger Stoffoberflächen für den Spektralbereich der Sonnenstrahlung.

Tabelle 2-8: Albedowerte in % für verschiedene Oberflächen.

	Oberfläche									
	Wolken	**Neuschnee**	**Altschnee**	**Sandboden**	**Acker**	**Nadelwald**	**Beton**	**Tiefes Wasser**	**Haut (Mensch)**	**Erde gesamt**
Albedo in %	60-90	75-95	40-70	15-40	7-17	5-12	14-22	~ 10	25-50	~30

Die Albedowerte, vor allem von Wasser, hängen stark vom Einfallswinkel der Strahlung ab. So kann laut [Hupfer und Kuttler 2006, S. 49] die Albedo bei hohem Sonnenstand nur wenige Prozent und bei geringer Sonnenhöhe und völlig ruhigem Wasser bis zu 50% betragen.

2.3.3 Rayleigh-Streuung

Die einfallende kurzwellige Strahlung der Sonne trifft in der Erdatmosphäre auf Luftmoleküle. Diese haben einen Durchmesser kleiner der betrachteten kurzwelligen Solarstrahlung. Die Strahlung wird an den Luftmolekülen gestreut, wobei dieser Vorgang stark wellenlängenabhängig ist. Die Rayleigh-Streuung ist zu der Wellenlänge der

gestreuten Strahlung umgekehrt proportional in der vierten Potenz ($1/\lambda^4$). Deshalb wird Licht des blauen Spektralbereiches rund 8- bis 10-mal so stark gestreut wie Licht des roten Spektralbereiches. [Liljequist und Cehak 2006, S. 16]; [Hupfer und Kuttler 2006, S. 47] Das Licht wird dabei in alle Richtungen gestreut, allerdings nicht in gleicher Intensität. Die Intensitätsunterschiede „[...] sind jedoch gering: Im Bereich der Maxima erreicht die Streuung kaum mehr als das Doppelte der Minimumwerte." [Häckel 2005, S. 188] Der Teil, der in Richtung der Erdoberfläche gestreut wird, bewirkt durch den überproportionalen Blauanteil die Blaufärbung des unbewölkten Himmels. Der Teil, der in den Weltraum hinaus gestreut wird, lässt die Atmosphäre der Erde auf Satellitenbildern bläulich erscheinen.

2.3.4 Mie-Streuung

Trifft die kurzwellige Solarstrahlung in der Erdatmosphäre auf Partikel, die größer als Luftmoleküle sind, verhält sich die Streuung umgekehrt proportional zu der Wellenlänge nach $1/\lambda^g$. Je nach Größe der Partikel kann g Werte zwischen 4 und 0 annehmen. Zu solchen Partikeln werden atmosphärische Verunreinigungen in Form fester und flüssiger Aerosolteilchen sowie Nebel- und Wolkentröpfchen gezählt. [Häckel 2005, S. 187]; [Hupfer und Kuttler 2006, S. 48] Nimmt g den Wert 4 an, handelt es sich um die oben beschriebene Rayleigh-Streuung. Je größer der Durchmesser der Partikel wird, desto kleiner wird g. Messungen zu Folge beschreibt ein Wert von g = 1,3 die durchschnittlichen Verhältnisse der Streuung an atmosphärischen Verunreinigungen am besten. [Liljequist und Cehak 2006, S. 16]; [Häckel 2005, S. 186] Dieser Wert entspricht einem Partikeldurchmesser von rund 1.000 nm. Für den Fall, dass die Teilchen größer als die Wellenlänge sind, handelt es sich um die Mie-Streuung. Im Gegensatz zur Rayleigh-Streuung ist die Mie-Streuung weniger Wellenlängenabhängig. Ist der Partikeldurchmesser viel größer als die Wellenlänge, streuen die Partikel praktisch alle Wellenlängen gleich stark. Es entsteht folglich keine spezifische Streufarbe. Gestreutes weißes Licht bleibt weiß, weshalb das an Wolken gestreute Licht die Wolken weiß erscheinen lässt. Neben der geringeren Wellenlängenabhängigkeit der Mie-Streuung gibt es einen weiteren Unterschied zur Rayleigh-Streuung: die Streurichtung. Größere Partikel in der Atmosphäre streuen das Licht nicht in alle Richtungen nahezu gleich intensiv. Die Streuung in Richtung des Lichtstrahls ist rund 400-mal so stark wie die Streuung gegen

die Richtung des Lichtstrahls. [Häckel 2005, S. 188] Dabei handelt es sich um die sogenannte Vorwärtsstreuung. Zudem ist die Mie-Streuung ist stark Standortabhängig. In trüber Luft (bspw. in stark besiedelten Gebieten mit Industrie wie das Ruhrgebiet) ist sie größer als in Gebieten mit sehr reiner Luft, bspw. den Polargebieten.

Die Streuung des von der Sonne ausgestrahlten Spektrums kann demzufolge in zwei Kategorien unterteilt werden:

- Rayleigh-Streuung: Streuung in der Erdatmosphäre, die durch die Luftmoleküle verursacht wird.
- Mie-Streuung: Streuung in der Erdatmosphäre, die durch atmosphärische Verunreinigungen verursacht wir.

Zudem tritt die Rayleigh-Streuung immer auf, während die Mie-Streuung abhängig von der Verunreinigung der Luft ist.

2.3.5 Gesamtextinktion

Die Gesamtextinktion des extraterrestrischen Strahlungsspektrums hängt von den vier beschriebenen Phänomenen Absorption, Reflexion, Rayleigh- und Mie-Streuung) ab. Abbildung 2-21 zeigt die jeweilige Auswirkung dieser Vorgänge auf die spektrale Verteilung der extraterrestrischen Strahlung beim Durchtritt durch die Erdatmosphäre.

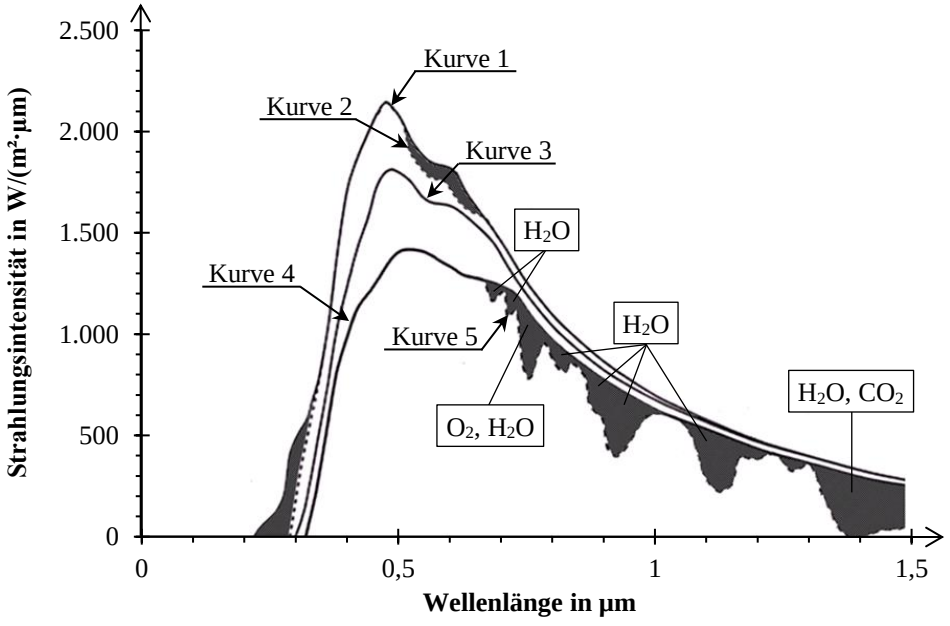


Abbildung 2-21: Veränderung des extraterrestrischen Strahlungsspektrums beim Durchgang durch die Erdatmosphäre.

Kurve 1 zeigt die extraterrestrische Spektralverteilung der Sonnenstrahlung. Kurve 2 beschreibt die Absorption der UV-C und UV-B Strahlung durch die Ozonschicht. Dabei deutet die dunkle Fläche im linken Diagrammbereich (λ < 300 nm) die für das kurzwellige ultraviolette Spektrum nahezu 100-prozentige Absorption an. Kurve 3 gibt die Schwächung der Strahlungsintensität durch die Rayleigh-Streuung an den Luftmolekülen wieder. Die vierte Kurve beschreibt die weitere Abschwächung der Strahlungsintensität durch die Mie-Streuung bei mittleren atmosphärischen Bedingungen. In Kurve 5 sind die weiteren Absorptionserscheinungen durch die eingezeichneten atmosphärischen Gase mitberücksichtigt (dunkle Flächen zwischen Kurve 4 und 5 für λ > 600 nm). Sie beschreibt damit die spektrale Verteilung der Solarstrahlung an der Erdoberfläche. Die Fläche, die sich aus der Differenz der Kurve 2 und 4 ergibt, ist dem Anteil der reflektierten und zurückgestreuten Solarstrahlung proportional. Die Kurven sind dabei jedoch nicht allgemein gültig. Sie geben einen guten Mittelwert bei durchschnittlichen atmosphärischen Bedingungen an, da die beschriebenen Effekte orts-, temperatur-, winkel- und tagesabhängig sind.

2.3.6 Air Mass

Wie bereits beschrieben, wird das Spektrum der extraterrestrischen Sonnenstrahlung auf dem Weg durch die Erdatmosphäre beeinflusst. Die Extinktionsintensität der Strahlung ist von der realen Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre bis zum Erreichen der Erdoberfläche abhängig. Dabei steigt die Extinktionsintensität mit steigender Weglänge. Auf einen festen Punkt auf der Erdoberfläche bezogen, ändert sich die Weglänge der solaren Strahlung durch die Erdatmosphäre mit dem Einfallswinkel. Abbildung 2-22 auf der nachfolgenden Seite verbildlicht das Prinzip.

Air Mass (AM) steht für die benötigte Weglänge der solaren Strahlung durch die Atmosphäre bezogen auf die Dicke der Atmosphäre und das damit einhergehende veränderte Spektrum. Das Strahlungsspektrum, das nicht von der Erdatmosphäre beeinflusst wird, wird als Air Mass 0 (AM 0) bezeichnet. Dabei handelt es sich um das solare Strahlungsspektrum außerhalb der Erdatmosphäre, gerade bis zu ihrer Oberkante. Die Zahl X hinter der Bezeichnung AM gibt das Vielfache des Weges der solaren Strahlung durch die Atmosphäre bezogen auf den senkrechten Durchtritt an. AM 1 ist folglich definiert als das Spektrum der senkrecht einfallenden Strahlung mit einer

Weglänge die der Dicke der Atmosphäre entspricht. Im Falle von AM 2 legt die Strahlung den doppelten Weg (im Vergleich zu AM 1) durch die Erdatmosphäre zurück. Der Wert X ist folglich vom Sonnenhöhenwinkel φ abhängig.

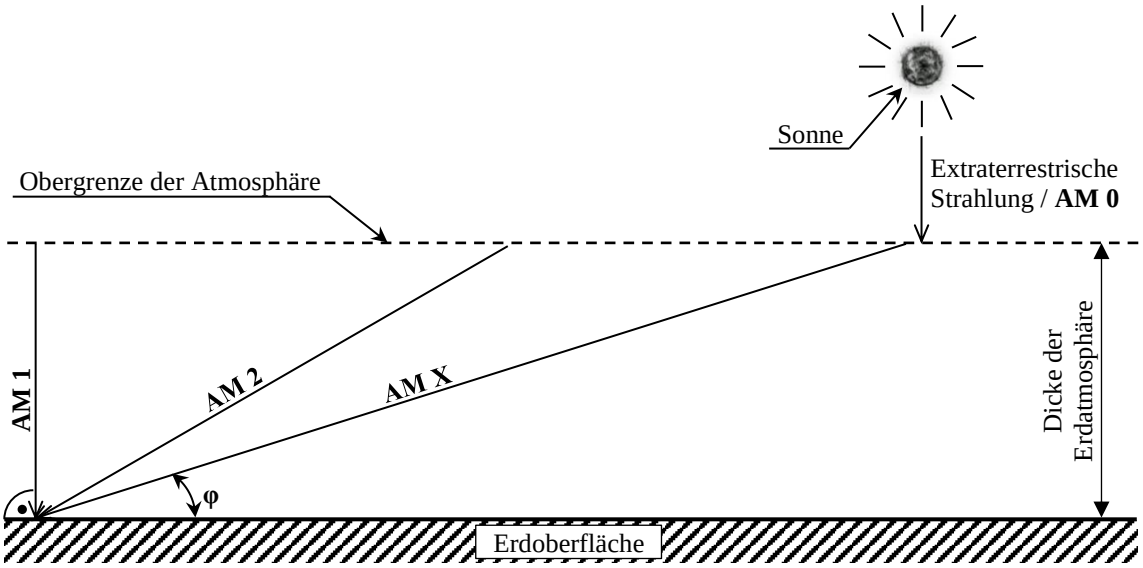


Abbildung 2-22: Abhängigkeit der Weglänge der solaren Strahlung durch die Erdatmosphäre vom Sonnenhöhenwinkel φ.

Ist der Sonnenhöhenwinkel φ bekannt, lässt sich das Vielfache des Strahlungsweges (AM X) bezogen zum senkrechten Einfall nach [Wagner 2010, S. 19], [Liljequist und Cehak 2006, S. 15] und [Mertens 2011, S. 39] mittels der nachstehenden Beziehung ausreichend genau berechnen (für Werte von $X \leq 3$):

$$X = \frac{1}{\sin \varphi}$$ **Formel 2-19**

Die Abhängigkeit der Extinktionsintensität ist zudem auf der direkt nachfolgenden Seite graphisch aufgearbeitet.

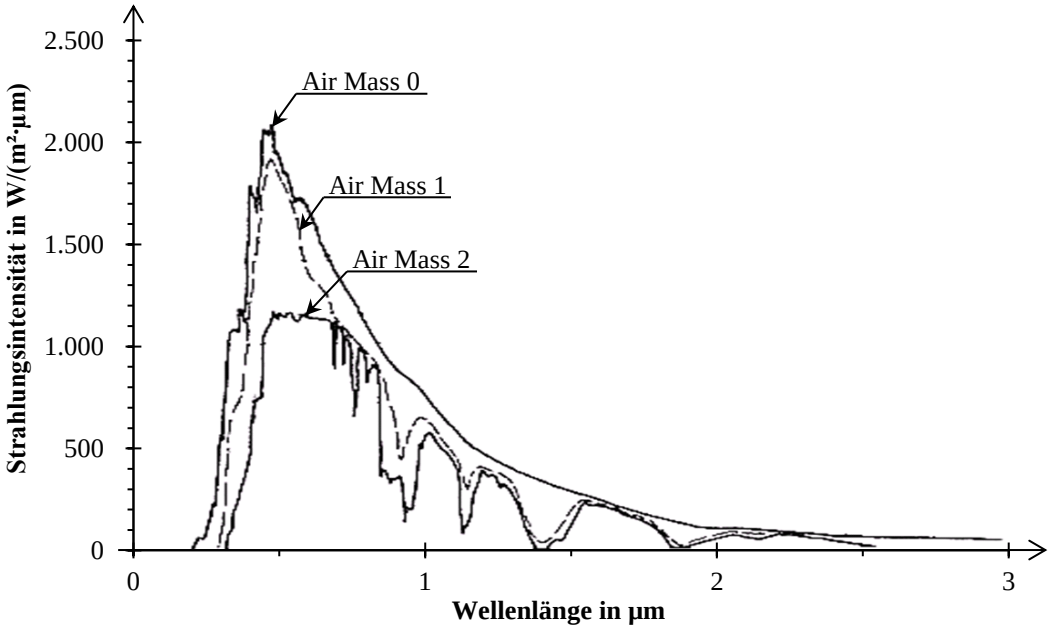


Abbildung 2-23: Extinktionsintensität in Abhängigkeit des Sonnenhöhenwinkels. Abbildung nach [Fischer 2011].

Die wichtigsten Spektren sind:

- AM 0: Extraterrestrisches Spektrum
- AM 1: Senkrechte Einstrahlung; beschreibt damit den kürzesten Weg der Strahlung durch die Atmosphäre
- AM 1,5: wird als durchschnittliches Jahresspektrum angesehen [Mertens 2011, S. 39]; entspricht dem mittleren Spektrum bei 45° geographischer Breite auf der Nordhalbkugel

Darüber hinaus tritt das AM 1,5 Spektrum näherungsweise an klaren Tagen zu bestimmten Uhrzeiten auf. Es wird in seiner spektralen Zusammensetzung nach IEC 60 904-3 als Standardspektrum (STC = Standard Test Conditions) zur Vermessung von Photovoltaikmodulen und deren Peakleistung genutzt.

Des Weiteren ist der Wert von AM vom Bezugsluftdruck abhängig. Weicht der Luftdruck von 1.000 mbar (einer Bezugsatmosphäre) ab, muss der nach Formel 2-19 berechnete Wert für X mit einem Korrekturfaktor p_L/1.000 multipliziert werden. Die Variable p_L entspricht dem Luftdruck der Bezugshöhe, gemessen in mbar. Mit steigender absoluter geographischer Höhe steigt bei Konstanz der sonstigen atmosphärischen Bedingungen und konstantem Sonnenhöhenwinkel folglich die Strahlungsintensität, da die solare Strahlung eine geringere Atmosphärendicke durchqueren muss.

2.4 Globalstrahlung

Wie im vorangegangenen Kapitel 2.3 beschrieben, bewirken verschiedene Effekte eine Abschwächung des ursprünglichen extraterrestrischen Strahlungsspektrums beim Durchgang durch die Erdatmosphäre. Der Teil der extraterrestrischen Strahlung, der die Erdatmosphäre ohne eine Veränderung durchdringt, wird als direkte Sonnenstrahlung bezeichnet. Der Teil, der durch Streuung und Reflexion an Wolken und Luftteilchen zum Erdboden gelangt, ist als diffuse Strahlung definiert. Auf einen Punkt auf der Erdoberfläche bezogen, ergibt sich der diffuse Strahlungsanteil aus der Summe aller schwachen Strahlungsanteile jeder Himmelsrichtung, abzüglich der direkten Sonnenstrahlung. [Mertens 2011, S. 40] Für die folgenden Betrachtungen ist allerdings nur die mit der kurzwelligen Strahlung insgesamt auf die Erdoberfläche auftreffende Energie von Bedeutung. Deshalb wird die Direktstrahlung mit der Diffusstrahlung zur Globalstrahlung zusammengefasst. Sie beschreibt folglich das aus der kurzwelligen Strahlung auf der Erdoberfläche zur Verfügung stehende Energieangebot. Welchen Beitrag welche der beiden Strahlungsarten zur Globalstrahlung liefert, ist von verschiedenen Faktoren wie bspw. der Bewölkung, dem Ort und der Jahreszeit abhängig. In Deutschland trägt die Diffusstrahlung im Jahresmittel mehr als die Hälfte zur eingehenden Globalstrahlung bei. Die folgende Abbildung zeigt deshalb die Anteile der Diffus- und Direktstrahlung an der Globalstrahlung als Monatsmittel über ein Jahr beispielhaft für einen süddeutschen Standort.

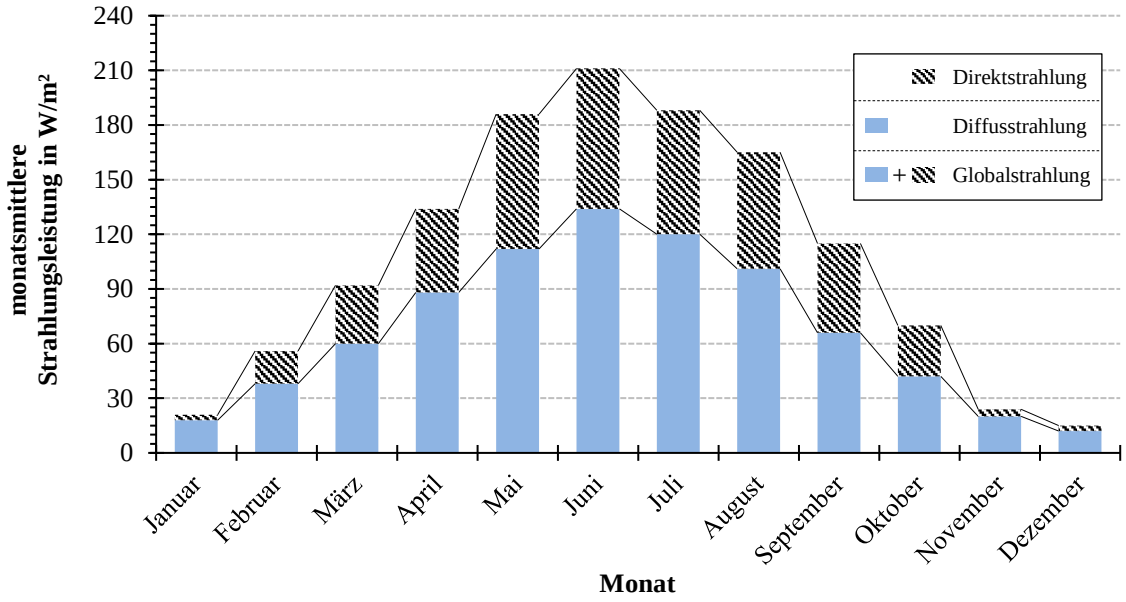


Abbildung 2-24: Durchschnittlicher Jahresgang der Diffus-, der Direkt- und der Globalstrahlung an einem süddeutschen Standort. Darstellung nach [Kaltschmitt und Streicher 2005, S. 50].

Wie der Abbildung 2-24 zu entnehmen ist, besteht die Globalstrahlung für den beispielhaften Standort im Winter fast ausschließlich aus Diffusstrahlung. Auch in den Sommermonaten überwiegt der Anteil der Diffusstrahlung, obwohl der Direktstrahlungsanteil an der Globalstrahlung deutlich zunimmt. Der Diffusstrahlungsanteil kann durch einen, als Cloud Enhancements beschriebenen Effekt noch erhöht werden. Dabei wird die Strahlung „[...] bei sonnigem Wetter und an hellen leichten Wolken rund um die Sonne [...]“ [Mertens 2011, S. 40f] gestreut. In südlicheren Ländern wie Ägypten ändert sich das Verhältnis zu Gunsten der Direktstrahlung. Die Aufteilung der Globalstrahlung in Direktstrahlung und Diffusstrahlung ist also von der geographischen Breite abhängig und verschiebt sich in Richtung Diffusanteil mit steigender Gradzahl. Dabei ist es vor allem die Direktstrahlung, die sich mit der geographischen Breite ändert und mit Richtung zum Äquator zunimmt. Aber nicht nur die geographische Breite, sondern auch die Bewölkung ist ein entscheidender Faktor für die Verteilung der Strahlungsanteile. Für Orte mit einer absoluten geographischen Höhe über dem Wolkenniveau nimmt der Diffusstrahlungsanteil Minimalwerte an und es dominiert die Direktstrahlung. Für Orte mit einer absoluten geographischen Höhe unter dem Wolkenniveau ist die Verteilung der Strahlungsanteile von der Bewölkung abhängig. Zuzüglich sind dann auch Effekte wie der schon beschriebene „Cloud Enhancement“ zu betrachten.

In vielen Orten Deutschlands wird die eingehende Globalstrahlung gemessen. Die Daten können dann zu Stunden-, Tages-, Monats- oder Jahresmittelwerten zusammengefast und in Globalstrahlungskarten dargestellt werden (vgl. Abbildung 2-25, S. 63). Durch die Bildung langjähriger Mittelwerte dieser Daten kann das für einen Standort durchschnittlich zu erwartende Strahlungsangebot ermittelt werden.

Aus Abbildung 2-25 lässt sich die Abhängigkeit der Globalstrahlung vom Ort und von der Jahreszeit ablesen. Die jahreszeitliche Schwankung der Globalstrahlung resultiert vor allem aus der Neigung der Rotationsachse der Erde gegen die Normale auf die Ebene der Erdumlaufbahn um die Sonne, die Ekliptik. Die Rotationsachse der Erde ist zurzeit um rund 23,5° geneigt, unterliegt aber mit einer Periode von circa 41.000 Jahren einer zyklischen Amplitude von 2,5° (zwischen 22° und 24,5°). [Häckel 2005, S. 180] Durch die Neigung bedingt, verändert sich der Einfallswinkel der solaren Strahlung auf die Erdoberfläche. Der mittlere Sonnenhöhenwinkel φ ist im Sommer größer als im Winter, wodurch sich der Wert der Air Mass für den Sommer verkleinert (vgl. Kap.: 2.3.6). Zusätzlich sind durch den größeren Sonnenhöhenwinkel im Sommer die Zeiten, in denen

die Sonne bspw. das deutsche Staatsgebiet bescheint, größer als die mittlere Sonnenscheindauer im Winter. Im Sommer ergibt sich somit durch die schwächere Extinktion und die längere Sonnenscheindauer eine höhere Globalstrahlungssumme als im Winter.

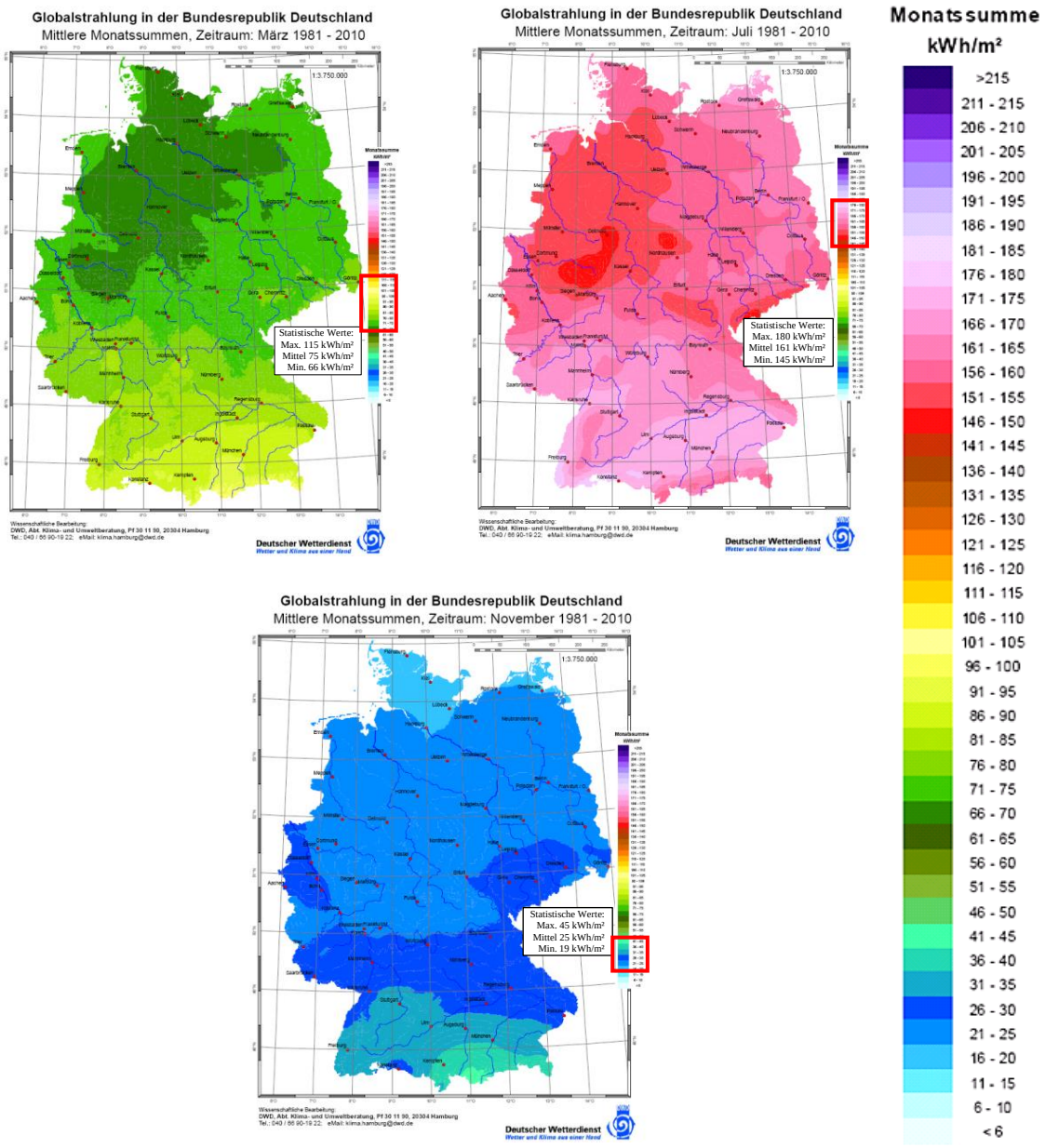


Abbildung 2-25: Globalstrahlung in Deutschland als mittlere Monatssummen für März, Juli und November im Zeitraum 1981 bis 2010. Abbildung aus [Deutscher Wetterdienst o.J.].

Die ortsabhängige Strahlungsvariation innerhalb Deutschlands ist von der geographischen Breite und der damit verbundenen Nähe zum Äquator abhängig. Wie bereits erwähnt, ändert sich mit steigender Gradzahl der geographischen Breite der Anteil der direkten Strahlung an der Globalstrahlung. Wie aus Abbildung 2-25 ersichtlich wird, besteht diese Abhängigkeit in allen drei betrachteten Monaten. Dieser Effekt wird noch

von der durchschnittlichen Wolkenbedeckung überlagert, die für den Süden Deutschlands geringer ausfällt als für den nördlichen Teil. [Kaltschmitt und Streicher 2005, S. 54] Somit lässt sich das Süd-Nordgefälle der Globalstrahlungswerte durch den höheren Direktstrahlungsanteil bei steigender Südorientierung und der geringeren mittleren Wolkenbedeckung der südlichen Regionen Deutschlands erklären.

Bei der Betrachtung der Abbildung 2-25 ist zwischen der Bestrahlungsstärke in W/m² und der Strahlungssumme in Wh/m² zu unterscheiden. Die Strahlungssumme ist das Produkt aus der Dauer des Strahlungsvorganges und der Bestrahlungsstärke. Für den Betrachtungszeitraum von 1 Stunde besitzt die Strahlungssumme den gleichen Wert wie das Stundenmittel der zugehörigen Bestrahlungsstärke: Liegt eine Strahlung einer Intensität von 1.000 W/m² vor und ist diese über 1 Stunde konstant, beträgt die (mittlere) Strahlungssumme 1.000 Wh/m².

2.4.1 Modell der Sonnen-Volllaststunden

Abbildung 2-26 zeigt die Jahressummen der Globalstrahlung für Deutschland im Jahr 2012, woraus ebenfalls das Süd-Nordgefälle der Globalstrahlungswerte deutlich hervorgeht.

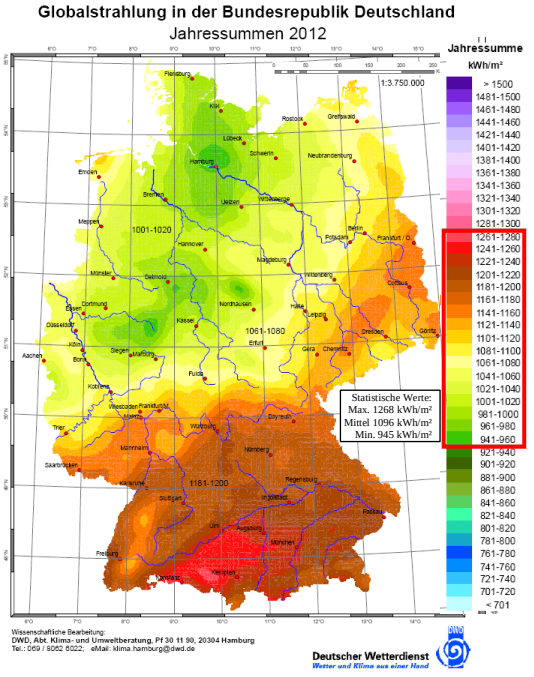


Abbildung 2-26: Jahressumme der Globalstrahlung für Deutschland im Jahr 2012 nach [Deutscher Wetterdienst o.J.].

Zudem kann laut [Mertens 2011, S. 44] im Sinne der nachfolgendenden Betrachtung von einer mittleren Globalstrahlungssumme von rund 1.000 kWh/(m²·a) für Deutschland ausgegangen werden. Für das Modell der Sonnen-Vollaststunden sind zwei Annahmen bezüglich der möglichen Zustände der Sonne zu treffen. Entweder strahlt die Sonne auf der Erdoberfläche mit einer Volllast von 1.000 W/m², was der Bestrahlungsstärke der Standardtestbedingungen für Photovoltaikmodule entspricht (mehr dazu im direkt nachfolgenden Kapitel: Standardtestbedingungen), oder sie ist vollkommen ausgeschaltet (E_S = 0 W/m²). Das Modell der Sonnen-Volllaststunden ist sonach mit folgender Frage äquivalent: Wie lange muss die Sonne mit Volllast strahlen, damit sie eine gegebene Strahlungssumme in kWh/(m²·a) an die Erdoberfläche abgibt?

$$Volllaststunden = \frac{gegebene\ Strahlungssumme}{Strahlungsstärke\ unter\ Volllast}$$

$$= \frac{1.000\left[\frac{kWh}{m^2 * a}\right] * 1.000\left[\frac{W}{kW}\right]}{1.000\left[\frac{W}{m^2}\right]} = \underline{\underline{1.000\,\frac{h}{a}}} \qquad \textbf{Formel 2-20}$$

Bei einer mittleren Globalstrahlungssumme von 1.000 kWh/(m²·a) müsste die Sonne dementsprechend jährlich 1.000 Stunden unter Volllast laufen (mit 1.000 W/m² auf der Erdoberfläche), um die gleiche Strahlungsleistung an die Erdoberfläche abzugeben, wie sie es tatsächlich über ein Jahr macht.

2.4.2 Standardtestbedingungen

Die Leistung von Photovoltaikmodulen wird unter Standardtestbedingungen (engl.: standard testing conditions, kurz: STC) gemessen, die im IEC 60904-3 Standard definiert sind. Diese genormten Messbedingungen legen die Rahmenbedingungen zur Ermittlung der Wirkungsgradangaben für verschiedene Solarzellen fest. [Kaltschmitt *et al.* 2005, S. 212]; [Mertens 2011, S. 31] Folgende Testbedingungen müssen vorherrschen:

- Temperatur der Solarzelle = 25 °C
- Bestrahlungsstärke = 1.000 W/m²; entspricht der Annahme aus dem Sonnen-Volllastmodell
- Spektrum des Standardlichtes = AM 1,5 (vgl. Kapitel 2.3.6: Air Mass)

Da im Labor keine Diffusstrahlung simuliert wird, sondern die Standardtestbedingungen für ein Strahlungsspektrum gemäß AM 1,5 sich nur auf Direktstrahlung beziehen, wurde die Strahlungsintensität auf 1.000 W/m² festgelegt. Dieser Wert entspricht ungefähr dem deutschen Jahressummenmittel aus diffuser und direkter Strahlung. Allerdings ergäbe die Integration des AM 1,5er Spektrums über die kurzwellige Strahlung unter idealen Bedingungen nach [Mertens 2011, S. 40] lediglich eine Strahlungsintensität von rund 835 W/m². Deshalb wird bei dem Spektrum für die Standardtestbedingungen von einem aufgewerteten AM 1,5-Spektrum gesprochen; aufgewertet um den Faktor 1.000/835. Die aufgewertete Strahlungsintensität auf 1.000 W/m² ist notwendig, um eine Vergleichbarkeit zu realen Prozessen zu schaffen, da sich die Globalstrahlung aus Diffusstrahlung und Direktstrahlung zusammensetzt und ebenfalls rund 1.000 W/m² für unsere Breiten beträgt. Die unter Standardtestbedingungen ermittelte Leistung einer Solarzelle wird Spitzenleistung oder Peakleistung genannt.

2.5 Lichtabsorption

Wenn Halbleiter beleuchtet werden, können sich ihre elektrischen Eigenschaften ändern. Unter beleuchten wird im Allgemeinen das Auftreffen von Licht auf eine Fläche verstanden. Im weiteren Sinne meint Licht nicht nur den Bereich des sichtbaren Lichtes (vgl. Anhang 2-2), sondern auch die angrenzenden Bereiche des Ultravioletts, des Infrarots und der Röntgenstrahlung. Licht gehört den elektromagnetischen Wellen an. [Lindner 1959, S.190] Nach Planck setzt sich jede Art von Strahlung, Lichtstrahlung inbegriffen, aus Energiequanten zusammen. Strahlungsenergiemengen können folglich nur in ganzzahligen Vielfachen eines Strahlungsquants ausgedrückt werden, welche frequenzabhängig sind. [Kuchling 2010, S. 537] Durch die Quantelung der Energie (keine stetigen Energiemengen) ist es möglich, jede Strahlung als einen Strom aus Teilchen zu betrachten: den sogenannten Photonen. Photonen sind aber keine Teilchen im eigentlichen Sinne, da sie keine Ruhemasse besitzen.

Nach dem zweiten Bohrschen Postulat erfolgt der Übergang eines Elektrons von einer Atomschale auf eine Andere nur im Zusammenhang mit der Absorption oder Emission (je nach Richtung des Elektronenübergangs) elektromagnetischer Strahlung. Ist E_1 die Energie des Elektrons vor dem Übergang, E_2 die Energie des Elektrons nach dem Übergang und f die Frequenz der elektromagnetischen Strahlung, gilt mit h als Planck'sches Wirkungsquantum ($6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J·s) für die Energie eines Photons folgende Beziehung:

$$E_{Ph} = |E_2 - E_1| = h * f \qquad \textbf{Formel 2-21}$$

Mit Hilfe des nachstehenden Ausdrucks kann die Frequenz der elektromagnetischen Strahlung sodann in eine Wellenlänge λ transformiert werden.

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \qquad \textbf{Formel 2-22}$$

Die Konstante c_0 beschreibt dabei die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum mit $2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s.

Erfolgt durch den Übergang eines Elektrons auf ein niedrigeres Energieniveau die Emission eines Strahlungsquants mit einer Frequenz, bzw. einer Wellenlänge (nach Formel 2-22) im Bereich des sichtbaren Lichtes, handelt es sich um die Emission eines

sogenannten Lichtquants. [Kuchling 2010, S. 537] Die so emittierten Wellenlängen sind für jede Atomart unterschiedlich und charakteristisch. Treffen Photonen mit einer Energie größer der Bandlücke ($E_{PH} \geq \Delta E_G$) auf einen Halbleiterkristall, können ähnlich wie bei der Zufuhr von thermischer Energie (vgl. Kapitel 2.1.1: Bändermodell) Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband gelangen. Um den Effekt genauer beschreiben zu können, ist es allerdings wichtig zwischen direkten und indirekten Halbleitern zu unterscheiden.

Nach dem Energieerhaltungssatz und dem Impulserhaltungssatz müssen die Energie und der Impuls bei der Absorption eines Photons erhalten bleiben. Bei direkten Halbleitern liegen das energetische Maximum des Valenzbandes und das energetische Minimum des Leitungsbandes, sprich der minimale Bandabstand, im Impulsraum direkt übereinander (vgl. Abbildung 2-27). Photonen besitzen im Vergleich zu ihrer Energie einen zu vernachlässigenden geringen Impuls. [Mertens 2011, S. 76]; [Fischer 2011, S. 10] Durch die spezielle Bandstruktur direkter Halbleiter reicht, für $E_{PH} \geq \Delta E_G$, die Übertragung der Energie eines Photons auf ein Elektron im Valenzband aus, um es in das Leitungsband zu heben. Durch die gleiche Lage des Valenzbandmaximums und des Leitungsbandminimums im Impulsraum ist eine Impulsübertragung nicht erforderlich.

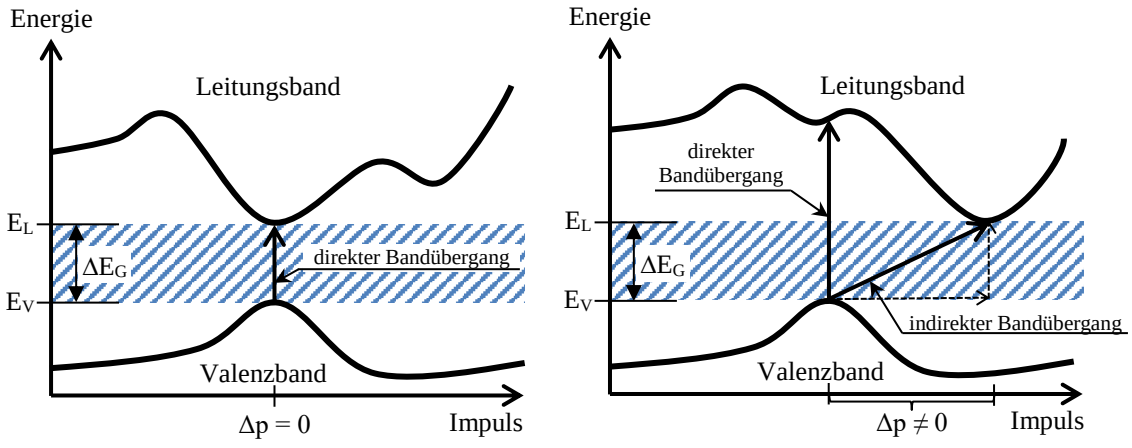


Abbildung 2-27: Direkte und indirekte Halbleiter im Bändermodell.

Anders verhält es sich bei indirekten Halbleitern. Dort liegen im Impulsraum energetisches Maximum des Valenzbandes und energetisches Minimum des Leitungsbandes verschoben. Um ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband zu heben, ist für einen direkten Bandübergang entweder eine größere Energie ($E_{PH} > \Delta E_G$) als der minimale Bandabstand notwendig, oder die reine Energieübertragung durch ein Photon ist dafür nicht ausreichend. In diesem Fall ist neben der Energieübertragung eine

Impulsübertragung geeigneter Stärke notwendig. Dabei handelt es sich um einen indirekten Bandübergang. Da Photonen aber nur einen zu vernachlässigenden Impuls besitzen, muss ein weiterer Akteur für den benötigten Elektronenimpuls sorgen: das Phonon. Phononen sind die Energiequanten der Gitterschwingungen. Durch ihre Quantelung kann ihnen ähnlich der elektromagnetischen Wellen ein Teilchencharakter zugeschrieben werden. Sie sind delokalisiert, sprich, sie existieren im gesamten Kristallgitter und lassen sich keinem exakten Ort zuschreiben. Im Gegensatz zu Photonen besitzen Phononen im Vergleich zu ihrem Impuls eine zu vernachlässigende Energie. [Kaltschmitt und Rau 2005, S. 202]; [Mertens 2011, S. 76] In einem indirekten Halbleiter sind für den indirekten Übergang eines Elektrons vom Valenzband in das Leitungsband folglich ein Photon (Bereitstellung der benötigten Energie) und ein Phonon (Bereitstellung eines geeigneten Impulses) notwendig. Es handelt sich also um einen 3-Körper-Prozess (Elektron, Photon, Phonon), wobei die drei Körper gleichzeitig zusammentreffen müssen. Somit ist ein indirekter Bandübergang unwahrscheinlicher als ein direkter Bandübergang. Als Konsequenz ist der Weg eines Photons in einem indirekten Halbleiter bis zu dessen Absorption im Mittel länger als bei direkten Halbleitern.

Fällt Licht auf einen Halbleiter, sinkt die Strahlungsintensität durch die Absorption der Photonen im Halbleiter kontinuierlich ab. Die Lichtabsorption und damit die Intensität der Strahlung im Halbleitermaterial wird durch eine exponentiell abfallende Funktion, dem Absorptionsgesetz, beschrieben:

$$I(x) = (1 - R) * I_0 * e^{-\alpha_{Abs} x} \qquad \textbf{Formel 2-23}$$

Die Strahlungsintensität *I(x)* an der Stelle x im Material entspricht der ursprünglichen Strahlungsintensität auf der Materialoberfläche (I_0) multipliziert mit dem Anteil der an der Materialoberfläche nicht reflektierten Strahlung ($1-R$) sowie der abfallenden Exponentialfunktion aus dem stoffspezifischen Absorptionskoeffizienten α_{Abs} und dem Durchgang der Strahlung durch die Materie in x-Richtung. Abbildung 2-28 Soll diesen Vorgang entsprechend verdeutlichen.

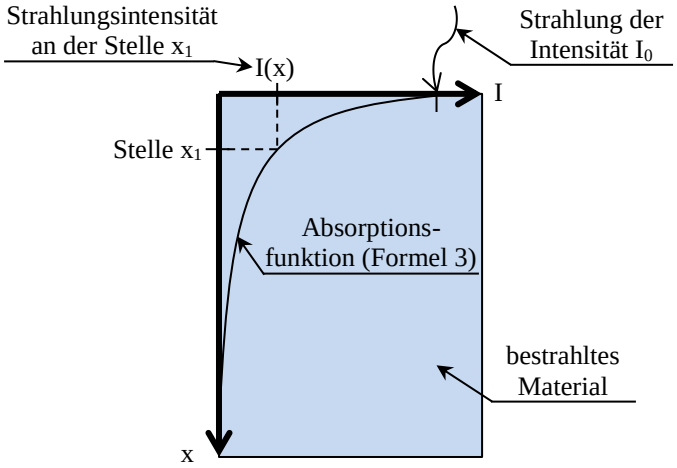


Abbildung 2-28: Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Eindringtiefe nach dem Absorptionsgesetz. Darstellung orientiert sich an [Mertens 2011, S. 75]

Für große Werte des Absorptionskoeffizienten α_{Abs} in cm^{-1} reichen folglich dünne Schichten des bestrahlten Materials aus, um den größten Teil des Lichtes zu absorbieren. Da der Weg eines Photons in einem indirekten Halbleiter bis zu dessen Absorption im Mittel länger ist als in direkten Halbleitern, muss folglich der Absorptionskoeffizient direkter Halbleiter größer sein als der von indirekten Halbleitern. Der materialspezifische Absorptionskoeffizient ist zudem abhängig von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung (Energie der Photonen). Die folgende Abbildung zeigt dies anhand verschiedener Halbleitermaterialien.

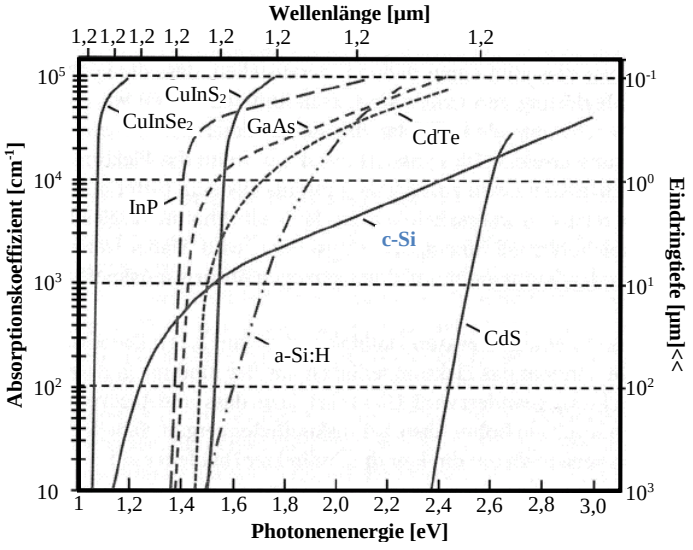


Abbildung 2-29: Materialspezifischer Absorptionskoeffizient in Abhängigkeit der Wellenlänge für verschiedenen Halbleiter. Abbildung nach [Mertens 2011, S. 78].

Die spektrale Abhängigkeit der Absorptionskoeffizienten der verschiedenen Halbleitermaterialen weist eine scharfe Absorptionskante im Bereich der Bandlücke auf. Treffen Photonen mit einer Energie $E_{PH} < \Delta E_G$ auf ein Halbleitermaterial, werden diese nicht absorbiert. Der Halbleiter ist für sie transparent. Die Absorptionskante deutet also auf eine Grenzwellenlänge hin, wobei eine steile Absorptionskante für direkte Halbleiter typisch ist. [Mertens 2011, S. 77]; [Wesselak und Schabbach 2009, S. 131f]

Tabelle 2-9 zeigt eine Übersicht verschiedener Halbleitermaterialien bezüglich der vorgenommenen Aufteilung nach direkten und indirekten Halbleitern, ihrer Bandlücke bei 300 K und dem zugehörigen Absorptionskoeffizienten α_{Abs} für Licht einer Wellenlänge von 600 nm.

Tabelle 2-9: Gegenüberstellung verschiedenen Halbleitermaterialien nach Art, Bandlücke und Absorptionskoeffizienten.

	Halbleitermaterial			
	kristallines Silizium	**amorphes Silizium**	**CdTe**	**GaAs**
Art des Halbleiters	Indirekt	Direkt	Direkt	Direkt
Bandlücke (300 K) in eV	1,12	1,7	1,44	1,43
Absorptionskoeffizient α_{Abs} in cm^{-1}	4.000	40.000	37.000	47.000

Wie aus Abbildung 2-29 ersichtlich wird, besitzen die meisten Halbleiter im Bereich des sichtbaren Lichtes sehr hohe Absorptionskoeffizienten, weshalb nur sehr dünne Schichten (im µm-Bereich) für hohe Absorptionsraten nötig sind. Je nach Dicke des Halbleitermaterials wird das kurzwellige Licht nahezu vollständig absorbiert, wohingegen die Halbleitermaterialien für langwelligeres Licht transparent sind. [Wesselak und Schabbach 2009, S. 132] Die Grenzwellenlängen des absorbierbaren Lichtes verschiedener Halbleitermaterialen ergeben sich nach [Becker *et al.* 2000, S. 92] durch folgende Beziehung:

$$\lambda_G = \frac{h * c_0}{E_G} \qquad \textbf{Formel 2-24}$$

Für kristallines Silizium beträgt nach Formel 2-24 die Grenzwellenlänge 1,1 µm (vgl. Abbildung 2-29). Kristallines Silizium gehört zu den indirekten Halbleitern, was sich auch durch den, im Vergleich zu den direkten Halbleitern, weniger steilen Anstieg des Absorptionskoeffizienten wiederspiegelt. Um eine hohe Absorptionsrate zu gewährleisten, sind deshalb für kristallines Silizium größere Schichtdicken notwendig

(200-300 µm) [Kaltschmitt und Rau 2005, S. 202]; [Wesselak und Schabbach 2009, S. 134]. Eine Möglichkeit die Schichtdicke von Halbleitern bei gleichen Absorptionsraten zusätzlich zu reduzieren, besteht darin, die Weglänge der Photonen im Halbleitermaterial zu verlängern. Dazu müssen die Halbleiter über optische Eigenschaften wie eine spezielle Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit verfügen, damit eine Totalreflexion der Photonen im Inneren der Halbleiter möglich wird.

Eine weitere Möglichkeit die Absorptionsrate bei gegebenen äußeren Bedingungen zu steigern, liegt in der Reduzierung des reflektierten Anteils der auf die Oberfläche treffenden Strahlung. Wird der reflektierte Strahlungsanteil R an der äußeren Materialoberfläche reduziert, steigt nach Formel 2-23 die Intensität der Strahlung im Halbleitermaterial an. Es steht also ein größerer Anteil der ursprünglichen, auf die Materialoberfläche treffenden Strahlungsintensität den Absorptionsvorgängen im Halbleitermaterial zur Verfügung. Die erstrebte Senkung der Strahlungsreflexion an der Materialaußenseite kann mittels Antireflexionsbeschichtungen beeinflusst werden.

2.5.1 Antireflexionsbeschichtungen

Um einen höheren Anteil der auf die Oberfläche des Halbleitermaterials treffenden Strahlung den Absorptionsvorgängen im Material zur Verfügung zu stellen, muss die auf der Materialoberfläche auftretende Reflexion verringert werden. Die Verringerung des Reflexionsgrades wird über eine Phasenverschiebung (Gangunterschied) der reflektierten Strahlen realisiert. Dabei wird der Phasenunterschied so gewählt, dass sich Wellenberge und Wellentäler der reflektierten Strahlung überdecken und sich somit auslöschen. Dazu müssen die Wellenzüge bei einem Gangunterschied von $\lambda/2$, $(3\lambda)/2$ und deren Vielfache die gleiche Amplitude und Wellenlänge aufweisen. [Lindner 1959, S.193] Wird eine homogene Antireflexionsschicht auf die Halbleitermaterialoberfläche aufgebracht und es fällt eine Strahlung (S) der Wellenlänge λ senkrecht auf die Antireflexionsschicht, wird sie an der Grenzfläche zur Antireflexionsschicht teilweise reflektiert (S_1). Der nicht reflektierte Teil ($S - S_1$) dringt in die Schicht ein und wird an der nächsten Grenzfläche (Antireflexionsschicht / Halbleitermaterial) ebenfalls teilweise reflektiert (S_2). Damit sich die beiden Teilstrahlen S_1 und S_2 gegenseitig auslöschen, müssen sie bei gleicher Amplitude einen, wie oben beschriebenen, Gangunterschied aufweisen. Damit die

Amplituden der beiden Teilstrahlen gleich groß sind (Amplitudenbedingung), muss der Brechungsindex der Antireflexionsschicht n_1 nach den Fresnel'schen Formeln:

$$n_1 = \sqrt{n_0 * n_2} \qquad \textbf{Formel 2-25}$$

sein. Da die Strahlung auf ihrem Weg in den Halbleiter die Medien Luft, Antireflexionsschicht und Halbleitermaterial in der genannten Reihenfolge durchläuft, sind die Brechungsindizes auch in der Reihenfolge zuzuordnen. Das Medium Luft besitzt den Brechungsindex n_0, n_1 beschreibt den Brechungsindex der Antireflexionsschicht und n_2 den Brechungsindex des Halbleitermaterials. Als Brechungsindex eines Stoffes wird das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit c_0 im Vakuum zur Lichtgeschwindigkeit c im stofflichen Medium verstanden. Der reflektierte Strahl S_2 wird am Phasenübergang zwischen n_1 und n_0 ebenfalls teilweise reflektiert. Streng genommen wird er folglich zwischen den Grenzflächen der Antireflexionsschicht und den beiden anderen Medien anteilig unendlich oft reflektiert. Dieses Verhalten kann aber vernachlässigt werden. Für den geforderten Gangunterschied errechnet sich die optimale Schichtdicke d_{AR} der Antireflexionsschicht mit a = 0,1,2,3,... folgendermaßen:

$$d_{AR} = \frac{(2 * a + 1) * \lambda}{4 * n_1} \qquad \textbf{Formel 2-26}$$

Trifft der Strahl nicht senkrecht, sondern unter einem bestimmten Winkel β auf die Oberfläche, wird Formel 2-26 zur Berechnung der Schichtdicke unter Einbezug des Snelliusschen Brechungsgesetzes wie folgt abgewandelt:

$$d_{AR} = \frac{(2 * a + 1) * \lambda}{4 * \sqrt{n_1^2 - n_0^2 * sin^2\beta}} \qquad \textbf{Formel 2-27}$$

Allerdings werden Strahlungen abweichender Wellenlänge nicht mit der gleichen Güte reflektiert und ausgelöscht, weshalb Oberflächen mit einer Antireflexionsschicht winkelabhängig farbig leuchten.

Nach den Fresnel'schen Formeln lässt sich nun der Reflexionsfaktor R für die vereinfachende Annahme des senkrechten Strahlungseinfalls wie folgt berechnen:

$$R = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2}\right)^2 \qquad \textbf{Formel 2-28}$$

Silizium besitzt für Licht einer Wellenlänge von 600 nm einen Brechungsindex von rund 3,9. Da Luft definitionsgemäß unter Standardbedingungen einen Brechnungsindex von 1 besitzt, beträgt der optimale Brechungsindex n_1 für das Material der Antireflexionsbeschichtung nach Formel 2-25 rund 1,975. Auf Grund seiner hervorragenden mechanischen Eigenschaften (Bruchfestigkeit, geringer Wärmeausdehnungskoeffizient et cetera) und einem Brechungsindex von circa 2 für Licht der Wellenlänge 600 nm hat sich der Werkstoff Siliziumnitrid (Si_3N_4) als Standardmaterial für Antireflexionsschichten bei siliziumbasierten Solarzellen durchgesetzt. Nach Formel 2-28 ergibt sich somit eine Reflexionsrate R für Siliziumnitrid beschichtete Siliziumhalbleiter bei Licht einer Wellenlänge von 600 nm zu:

$$R = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2}\right)^2 = \left(\frac{2^2 - 1 * 3{,}9}{2^2 + 1 * 3{,}9}\right)^2 = 0{,}00016 = \underline{\underline{0{,}016\ [\%]}} \qquad \textbf{Formel 2-29}$$

und einer nach Formel 2-26 optimalen Schichtdicke d_{AR} von $(2 \cdot a + 1) \cdot 75$ nm. Die so gewählte Schichtdicke ist allerdings nur für Licht einer Wellenlänge von 600 nm optimal. Für hohe Absorptionsraten der auf einen Halbleiter eintreffenden Globalstrahlung muss aber möglichst der gesamte Spektralbereich optimal genutzt werden. In der Praxis „[...] wird die Schichtdicke auf minimale Reflexion bei λ = 600 nm abgestimmt.“ [Mertens 2011, S. 80]

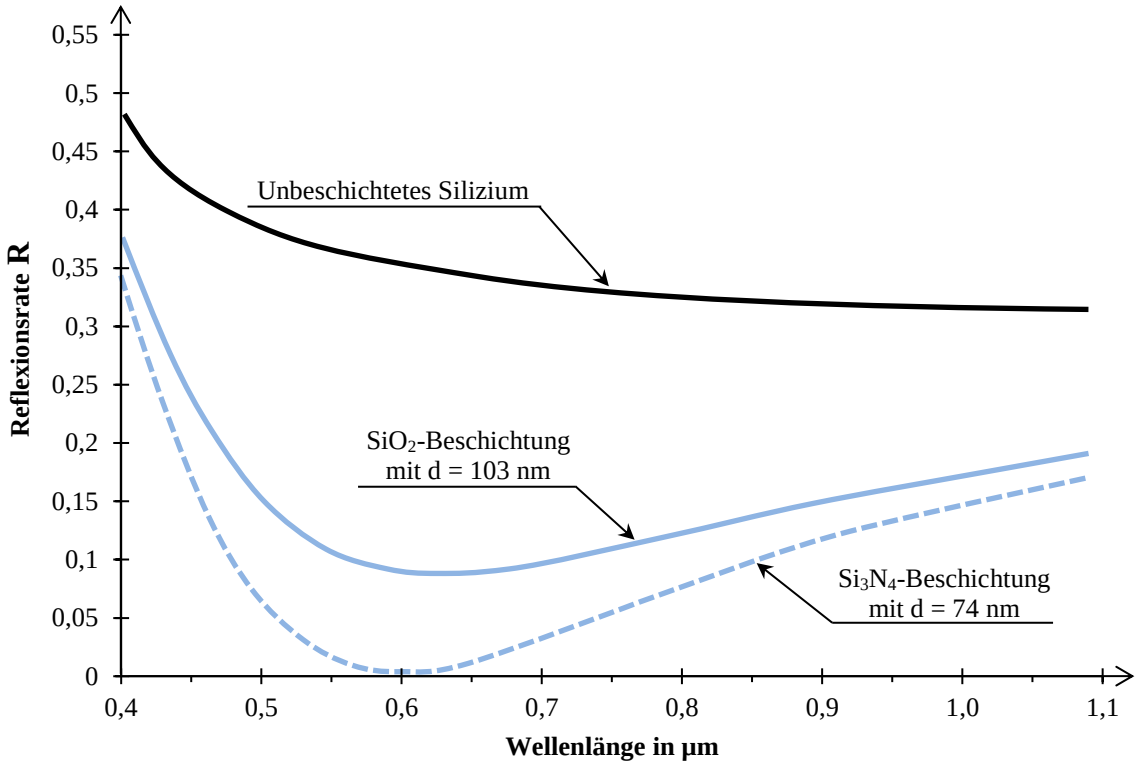


Abbildung 2-30: Reflexionsraten in Abhängigkeit der Wellenlänge für unbeschichtetes Silizium, eine Siliziumoxidbeschichtung und eine Beschichtung mit Siliziumnitrid. Darstellung nach [Mertens 2011, S. 81].

Wie aus der Abbildung 2-30 und den vorhergehenden Berechnungen zu entnehmen ist, kann die Reflexionsrate durch spezielle Beschichtungen für bestimmte Wellenlängen minimiert werden. So treten im Spektralbereich von 600 nm durch eine Siliziumnitridbeschichtung nahezu keine Reflexionen mehr auf. Zwar steigt der Reflexionsgrad für Wellenlängen ≠ 600 nm auf bis zu 34 % an, liegt aber immer noch deutlich unter dem Reflexionsgrad von unbeschichtetem Silizium.

Als Einschränkung der Ergebnisse bleibt festzuhalten, dass die Berechnungen unter der vereinfachenden Annahme eines senkrechten Strahlungseinfalls durchgeführt wurden. Flacht der Strahlungseinfall zum Winkel $\beta < 90°$ ab, ändert sich der Gangunterschied der reflektierten Strahlen, was eine erhöhte Reflexionsrate zur Folge hat.

2.5.2 Photoeffekt

Grundsätzlich beschreibt der Photoeffekt die Übertragung der gesamten Energie von Quanten elektromagnetischer Strahlung (Photonen) auf Elektronen in einem Material. Dabei wird zwischen äußerem und innerem Photoeffekt unterschieden.

Beim äußeren Photoeffekt trifft energiereiche UV-Strahlung auf die Materialoberfläche. Ist die Photonenenergie ausreichend hoch, können die Elektronen so viel Energie aufnehmen, dass sie die zum Verlassen der Festkörperoberfläche erforderliche Austrittsarbeit W_A überwinden. Das Elektron wird folglich so weit über das Leitungsband angehoben, dass es nicht mehr zum Festkörper gezählt wird. [Kaltschmitt und Rau 2005, S. 203] Die Austrittsarbeit ist eine materialspezifische Größe, die abhängig von der energetischen Lage der zu emittierenden Elektronen im und dem Oberflächenpotential des Festkörpers ist. Nach dem Austritt eines Elektrons besitzt es die kinetische Energie:

$$E_{kin} = h * f - W_A \qquad \textbf{Formel 2-30}$$

Die energetische Grenze dafür ist als Ionisierungsgrenze definiert. Ein Spezialfall des äußeren Photoeffektes ist die Photoionisation. Ionisation beschreibt dabei den Vorgang, bei dem aus einem Atom oder Molekül ein oder mehrere Elektronen durch die zugeführte Energie austreten können, weshalb das Atom oder Molekül schließlich als positiv geladenes Ion (Kation) zurückbleibt.

Beim inneren Photoeffekt werden indessen Elektronen der bestrahlten Materie durch Absorption elektromagnetischer Strahlung vom Valenzband ins Leitungsband angehoben. Es wird ein Elektronen-Loch-Paar gebildet, wodurch sich die elektrische Leitfähigkeit des Festkörpers erhöht (vgl. Kapitel 2.1: Halbleiter und 2.5 Lichtabsorption).

Der innere Photoeffekt stellt die Basis für den in Solarzellen genutzten photovoltaischen Effekt dar. Zur weiteren Beschreibung dieses Effektes wird entsprechend auf das subsekutive Kapitel 3: Solarzellentechnologie verwiesen.

KAPITEL 3

SOLARZELLENTECHNOLOGIEN

Dieses Kapitel soll aufbauend auf dem vorangegangenen Grundlagenkapitel eine spezifische technologiebezogene Wissensbasis liefern. Hierfür werden die verschiedenen Solarzellentechnologien sowohl in ihrer Funktionsweise als auch ihrem Aufbau detailliert betrachtet. Dies ist insofern von Bedeutung, als dass sich daraus die Ingredienzien der Solarmodule ableiten und die Verfahrenstechnik der Aufbereitungsmaßnahmen während eines potenziellen Recyclings an diesen Gegebenheiten ausgerichtet ist. Die verschiedenen Solarzellentechnologien beruhen in ihrem grundlegenden Aufbau totaliter auf der Nutzung des photovoltaischen Effektes. Um die verschiedenen Technologien zu verstehen und deren unterschiedlichen Aufbau begründen zu können, muss demnach zuvörderst die Wirkungsweise des photovoltaischen Effektes erläutert werden. Dies soll im ersten Unterkapitel anhand eines beleuchteten (vgl. Kapitel 2.5) und unsymmetrisch dotierten pn-Übergangs (mit charakteristischen Dotierkonzentrationen) geschehen.

Kapitelfeingliederung

3.1 DER PHOTOVOLTAISCHE EFFEKT 79
3.2 ÜBERBLICK DER VERSCHIEDENEN TECHNOLOGIEN 85
3.3 EVOLUTION DER KRISTALLINEN SILIZIUMSOLARZELLE 88
3.3.1 Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1960er 88
3.3.2 Die frühe 1970er „violet cell“ 91
3.3.3 Chemically textured non-reflecting „black cell” 93
3.3.4 Hocheffizienzzellen 98
3.3.4.1 Buried-Contact-Zelle 98
3.3.4.2 Rückkontaktzelle 99
3.3.4.3 PERL-Zelle 102
3.3.5 Betrachtungen zum Wirkungsgrad kristalliner Siliziumsolarzellen 106
3.3.5.1 Historische Entwicklung 106
3.3.5.2 Theoretische Begrenzung 108
3.4 DÜNNSCHICHTZELLENTECHNOLOGIE 117
3.4.1 HIT-Zelle 117
3.4.2 Zellen aus amorphem Silizium 119
3.4.2.1 Eigenschaften amorphes Silizium 120
3.4.2.2 pin-Struktur 124
3.4.2.3 Stapelzellen (Tandem- und Tripelzellen) 128
3.4.2.4 Zellen aus mikrokristallinem Silizium 132
3.4.3 Cadmiumtelluridzellen 135
3.4.4 Zellen aus der Gruppe CIS/CIGS – $Cu(In,Ga)Se_2$ 140
3.4.5 Serienverschaltung 145

3.1 Der photovoltaische Effekt

Treffen Energiequanten elektromagnetischer Strahlung (Photonen) auf einen Halbleiter, können, in Abhängigkeit von der Art des Halbleitermaterials, Valenzelektronen auf unterschiedliche Art und Weise in das Leitungsband gelangen. Dieser bereits im Kapitel 2.5: Lichtabsorption beschriebene Vorgang würde allerdings auch in nicht dotierten Halbleitermaterialien zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares führen. Wenngleich daraus eine Steigerung der Eigenleitungsdichte und damit eine Erhöhung der Leitfähigkeit des Halbleiters resultieren würde, kann dieses Verhalten lediglich in lichtabhängigen Widerständen genutzt werden; es trägt nicht zur Erzeugung von elektrischer Energie bei.

Wird hingegen ein unsymmetrisch dotierter pn-Übergang beleuchtet, ist die Wirkung des absorbierten Photons an dessen Absorptionsstelle gebunden. Grundsätzlich gilt, dass durch die Absorption eines Photons ortunabhängig ein Elektronen-Loch-Paar generiert wird. Durch die im Kapitel 2.5: Lichtabsorption beschriebene Abhängigkeit des materialspezifischen Absorptionskoeffizienten von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung dringen Photonen unterschiedlicher Spektralbereiche im Mittel auch unterschiedlich tief in den Halbleiter ein und können somit in unterschiedlichen Bereichen des pn-Übergangs absorbiert werden.

Es wird sonach zwischen den folgenden drei Absorptionszonen unterschieden:

- Fall **A**: Absorption in der Raumladungszone
- Fall **B**: Absorption in der n-dotierten Schicht
- Fall **C**: Absorption in der p-dotierten Schicht

Im Fall A wirkt ein Photon auf ein Valenzelektron in der RLZ. Das vorherrschende elektrische Feld trennt unmittelbar das neu entstandene Ladungsträgerpaar (Elektronen-Loch-Paar). Dabei werden die freien Elektronen auf Grund des elektrischen Feldes zur n-dotierten Schicht und die Löcher zur p-dotierten Schicht gelenkt. Abbildung 3-1 auf der nachfolgenden Seite verdeutlicht dieses Prinzip grafisch.

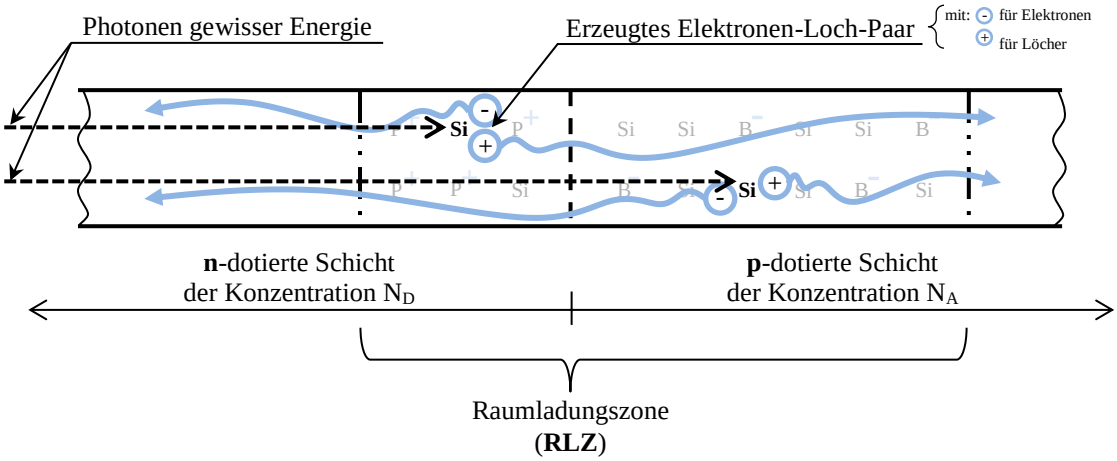


Abbildung 3-1: Trennung des entstandenen Ladungsträgerpaares durch das in der Raumladungszone vorherrschende elektrische Feld.

Wirkt ein Photon stattdessen auf ein Valenzelektron in bspw. der p-dotierten Schicht, kann ein aus dem neu entstandenen Elektronen-Loch-Paar generiertes Elektron durch Diffusion und die thermische Eigenbewegung (ohne Wirken des elektrischen Feldes) die RLZ-Grenze erreichen. Analog gilt dies für Löcher aus der n-dotierten Schicht. An der Raumladungszonengrenze wirkt das elektrische Feld auf die Majoritäts- und Minoritätsträger wie folgt:

Tabelle 3-1: Wirkung des elektrischen Feldes an der Raumladungszone auf die Majoritäts- und Minoritätsträger.

	Herkunft	
	p-Schicht	**n-Schicht**
Majoritätsträger	Scheitern an Potenzialbarriere der RLZ	
Minoritätsträger	Werden vom elektrischen Feld erfasst und zur gegenüberliegenden Seite beschleunigt	

Die mittels der Ladung des elektrischen Feldes (RLZ) vorgenommene Trennung von einem durch ein infiltrierendes Photon erzeugten Ladungsträgerpaares wird als licht-induzierte Ladungsträgertrennung bezeichnet und definiert den photovoltaischen Effekt. Dabei leistet die lichtinduzierte Ladungsträgertrennung nur dann einen Beitrag zum photovoltaischen Effekt, wenn mindestens einer der durch das infiltrierende Photon entstandenen Ladungsträger (Elektron und/oder Loch) tatsächlich die pn-Grenzfläche überschreiten.

In den folgenden zwei Tabellen sind, aufgeschlüsselt nach der Ladungsträgerart, die Vorgänge der lichtinduzierten Ladungsträgertrennung und deren möglicher Beitrag zum photovoltaischen Effekt in Abhängigkeit vom Absorptionsort des Photons nochmals als Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 3-2: Beitrag eines freien Elektrons zum photovoltaischen Effekt in Abhängigkeit vom Absorptionsort.

Freies Elektron		**Fall**	**Transportrichtung**	**Effekt**	**Beitrag zum photovoltaischen Effekt**
Absorptionsort	**n-Schicht**	B	Verbleib in n-Schicht	Potenzialbarriere	Bedingt
	RLZ	A	Richtung n-Schicht	Elektrisches Feld der RLZ	Ja
	p-Schicht	C_1	1. Gelangen an RLZ-Grenze 2. Transport Richtung n-Schicht	Diffusion und thermische Eigenbewegung Beschleunigung durch elektrisches Feld der RLZ	Ja
		C_2	Gelangen nicht an RLZ-Grenze	Verlust der Energie und Rekombinationsprozesse	Nein

Tabelle 3-3: Beitrag eines Lochs zum photovoltaischen Effekt in Abhängigkeit vom Absorptionsort.

Loch		**Fall**	**Transportrichtung**	**Effekt**	**Beitrag zum photovoltaischen Effekt**
Absorptionsort	**n-Schicht**	B_1	1. Gelangen an RLZ-Grenze 2. Transport Richtung p-Schicht	Diffusion und „Wandern“ der Löcher Beschleunigung durch elektrisches Feld der RLZ	Ja
		B_2	Gelangen nicht an RLZ-Grenze	Rekombinationsprozesse	Nein
	RLZ	A	Richtung p-Schicht	Elektrisches Feld der RLZ	Ja
	p-Schicht	C	Verbleib in p-Schicht	Potenzialbarriere	Bedingt

Im Idealfall werden die in der RLZ generierten Elektronen durch das elektrische Feld in die n-Schicht gelenkt (Fall A). Die in der p-Schicht generierten Elektronen werden nach Erreichen der RLZ-Grenze durch das elektrische Feld ebenfalls in Richtung n-Schicht beschleunigt (Fall C_1) und die in der n-Schicht generierten Elektronen verbleiben durch die Potenzialbarriere dort (Fall B). Analog umgekehrt gilt dies für die generierten Löcher.

Durch die lichtinduzierte Ladungsträgertrennung kommt es in der n-dotierten Schicht zur Anreicherung von Elektronen (Überschuss frei beweglicher negativer Ladung) und damit einhergehend zu einer negativen Aufladung. Gleiches gilt in umgekehrter Weise für die p-dotierte Schicht mit einer Anreicherung von Löchern und einer damit einhergehenden positiven Aufladung.

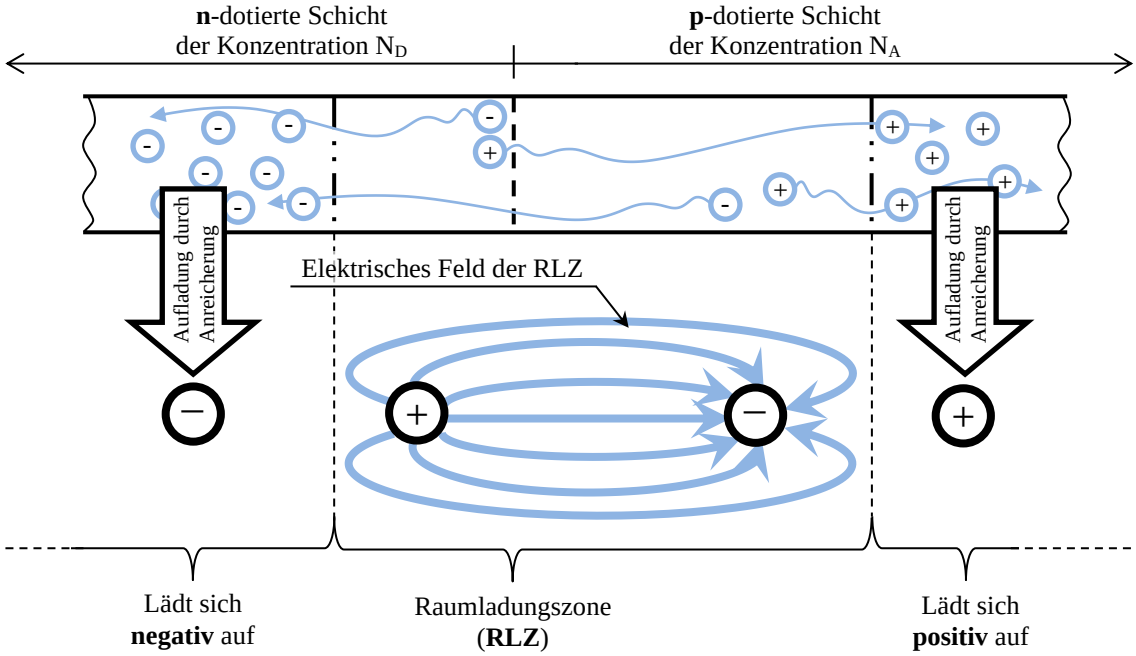


Abbildung 3-2: Lichtinduzierte Ladungsträgertrennung und die Anreicherung von Elektronen und Löchern in den jeweiligen Schichten.

Wie in den Fällen B_2 und C_2 (vgl. Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3) beschrieben, können durch den Photoeffekt generierte Minoritätsträger der jeweiligen Schicht auf ihrem Weg zur Raumladungszone Energie verlieren oder durch Rekombinationsprozesse „abhanden“ gehen. Sie tragen damit nicht zum photovoltaischen Effekt bei. Je weiter die Generierung der Ladungsträgerpaare von der RLZ-Grenze entfernt ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Rekombination. Dies wird durch die sogenannte Diffusionslänge quantifiziert. Die Diffusionslänge beschreibt diejenige Weglänge, die Ladungsträger in einem feldfreien Kristall mittels Diffusion zurücklegen können, ehe sie rekombinieren. Die Diffusionslänge ist abhängig von Halbleitermaterial selbst, sowie von dessen Dotierung (Verunreinigung) und der Kristallperfektion. [Kaltschmitt *et al.* 2005, S. 206]

Die Diffusionslänge $L_{n/u}$ wird mittels der Lebensdauer der Ladungsträger $\tau_{n/u}$ wie folgt berechnet:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \qquad \textbf{Formel 3-1}$$

$$L_p = \sqrt{D_u \tau_u} \qquad \textbf{Formel 3-2}$$

Die Ladungsträgerlebensdauer beschreibt, wie lange ein generierter Ladungsträger im Mittel Existent ist, bis er wieder rekombiniert. $D_{n/u}$ ist der materialspezifische Diffusionskoeffizient. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht typischer Diffusionslängen einiger Halbleiter.

Tabelle 3-4: Diffusionslängen ausgewählter Halbleiter nach [Enderlein und Schenk 1992, S. 276].

		Diffusionskoeffizient		**Diffusionslänge**			
		D_n [cm²/s]	**D_p** [cm²/s]	**L_n** [µm]		**L_u** [µm]	
				τ_n = 0,1 µs	τ_n = 1 µs	τ_u = 0,1 µs	τ_u = 1 µs
Halbleiter	**Si**	34,9	12,9	18,7	59,1	11,4	35,9
	Ge	100,8	49,1	31,7	100,4	22,2	70,1
	GaAs	227,5	10,3	47,7	150,8	10,1	32,1

Für sehr reine Materialien mit perfekter Kristallstruktur sind wesentlich längere Ladungsträgerlebensdauern möglich, da eine Rekombination unwahrscheinlicher wird. Mit steigender Ladungsträgerlebensdauer steigt auch die Diffusionslänge (vgl. Formeln 3-1 und 3-2); sie kann Werte von einigen hundert Mikrometern annehmen. [Enderlein und Schenk 1992, S. 276], [Mertens 2011, S. 86]

Aus der Diskussion der um die Tabellen 3-2 und 3-3 sowie der Betrachtung der Diffusionslängen geht schließlich hervor, dass ein in der RLZ generierter Ladungsträger (Fall A) mit einer höheren Wahrscheinlichkeit einen Beitrag zum photovoltaischen Effekt liefert, als ein in einer der beiden Schichten (Fall B und C) generierten Ladungsträger.

Zusätzlich ist die Wahrscheinlichkeit eines Beitrags zum photovoltaischen Effekt im Fall B größer als im Fall C. Dies ist, wie später gezeigt wird, konstruktionsbedingt, da bei kristallinen Standardsolarzellen die n-dotierte Schicht wesentlich dünner als die p-dotierte Schicht ausgeführt wird. Somit ist die Wahrscheinlichkeit eines Ladungsträgerverlustes durch den kürzer zurückzulegenden Weg geringer. Es lässt sich demnach

folgende Aussage für die Wahrscheinlichkeiten (P) des Beitrags zum photovoltaischen Effekt treffen:

$$P\ (Fall\ A) \gg P\ (Fall\ B) > P\ (Fall\ C) \quad \textbf{Formel 3-3}$$

Da, wie bereits gezeigt, lichtgenerierte Ladungsträger in den Fällen B_2 und C_2 auf dem Weg zur RLZ-Grenze verloren gehen können und somit teilweise keinen Beitrag zum photovoltaischen Effekt liefern, ist die Wahrscheinlichkeit eines Beitrags zum besagten Effekt eine Funktion der Entfernung des Generierungsprozesses zur RLZ.

$$P\ (Fall\ B\ und\ C) = f(Entfernung\ des\ Generierungsprozesses\ zur\ RLZ) \quad \textbf{Formel 3-4}$$

Um die Wahrscheinlichkeiten eines Beitrags der Fälle B und C zum photovoltaischen Effekt zu steigern, sollte die Diffusionslänge folglich wesentlich größer sein, als die maximale Absorptionstiefe der auftreffenden Strahlung.

3.2 Überblick der verschiedenen Technologien

Die verschiedenen Solarzellentechnologien unterscheiden sich auf verschiedenste Art und Weise in ihrem Aufbau und damit der Nutzung des photovoltaischen Effekts. Um die einzelnen Technologien besser beschreiben zu können, werden Sie nach der folgenden Abbildung thematisch unterteilt:

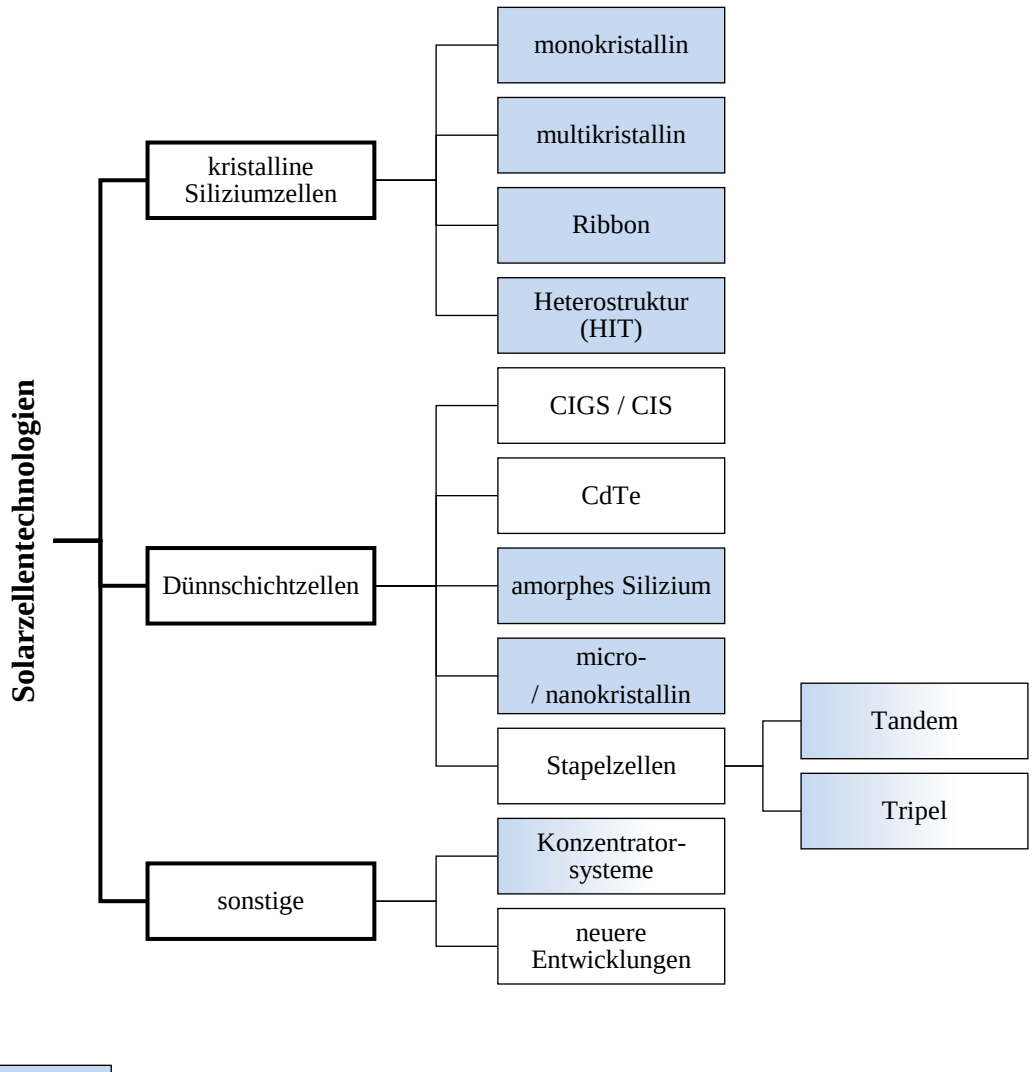


Abbildung 3-3: Einteilung der Solarzellentechnologien.

Dünnschichtzellen können als Halbleiter sowohl Silizium (nicht in kristalliner, sondern in amorpher Form) als auch andere Rohstoffe wie beispielshalber Cadmium-Tellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-Diselen (CIS) enthalten.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Dünnschichttechnologie und kristallinen Siliziumzellen besteht darin, „[…] daß [sic!] die Dünnschichttechnologie keine Zellen als kleinste stromproduzierende Einheit besitzen, sondern eine dünne Schicht des Halbleitermaterials flächig auf ein Trägermaterial aufgetragen wird (daher auch die Bezeichnung „Dünnschicht“).“ [Sander *et al.* 2004, S. 17] Obwohl kristallines Silizium ein indirekter Halbleiter ist und einen niedrigen Absorptionskoeffizienten besitzt (vgl. Tabelle 2-9), beherrschen Solarzellen aus kristallinem Silizium den Photovoltaikmarkt. Grund dafür ist, dass Silizium als meistgenutztes Halbleitermaterial sowohl das theoretisch am besten verstandene, als auch das technologisch am besten beherrschte Halbleitermaterial darstellt, da es damit auch in anderen Bereichen der Halbleiterindustrie langjährige Erfahrungen gibt. Seit den 1970ern wurde neben der kristallinen Siliziumtechnologie aber auch an der Dünnschichttechnologie geforscht. Für Dünnschichtzellen sind allerdings direkte Halbleitermaterialien notwendig, da sie über größere Absorptionskoeffizienten verfügen. [Kaltschmitt *et al.* 2005, S. 213]

Zum besseren Verständnis des Aufbaus und der Wirkungsweise der einzelnen Solarzellentechnologien werden an dieser Stelle neue Begrifflichkeiten zur Beschreibung der Dotierkonzentrationen und der Art der dotierten Schichten eingeführt. Nachdem der Begriff der Dotierung bereits im Kapitel 2.1 der chemischen Verunreinigung gleichgesetzt wurde, ist er nachstehend vielmehr als die gezielte Implementation von Fremdatomen in einen Halbleiter zu verstehen. Zudem wurde bereits zwischen n- und p-Dotierung unterschieden. Tabelle 3-5 erweitert diese Einteilung und stellt den verschiedenen Dotierkonzentrationen ihre geläufigen Bezeichnungen gegenüber. Weiter gibt sie die Konzentrationen von Donatoren und Akzeptoren in Halbleitern basierend auf kristallinem Silizium an.

Tabelle 3-5: Geläufige Bezeichnungen verschiedener Dotierkonzentrationen.

		Symbol	**Typisches Verhältnis**	**Konzentration** [Fremdatom / cm³]
Dotierkonzentration	**schwach**	n^-	1 Donator / > 10^7 Atome	< $5 \cdot 10^{15}$
		p^-	1 Akzeptor / > 10^6 Atome	< $5 \cdot 10^{16}$
	mittel	n	1 Donator / 10^7 Atome	$5 \cdot 10^{15}$
		p	1 Akzeptor / 10^6 Atome	$5 \cdot 10^{16}$
	stark	n^+	1 Donator / 10^4 Atome	$5 \cdot 10^{18}$
		p^+	1 Akzeptor / 10^4 Atome	$5 \cdot 10^{18}$
	sehr stark	n^{++}	1 Donator / < 10^4 Atome	> $5 \cdot 10^{18}$
		p^{++}	1 Akzeptor / < 10^4 Atome	> $5 \cdot 10^{18}$

Die Konzentration der Fremdatome je Kubikzentimeter eines Siliziumkristalls errechnet sich aus der Division der Anzahl an Siliziumatomen N_{Si} je Kubikzentimeter des Halbleiters durch das Verhältnis von Akzeptoren, bzw. Donatoren zur Atomanzahl. Da Silizium eine Atommasse von 28,09 g/mol und eine Dichte von 2,33 g/cm³ (bei 300 K) besitzt [Becker *et al.* 2000, S. 97], kann die Anzahl an Siliziumatomen N_S in einem Kubikzentimeter des Kristalls wie folgt berechnet werden:

$$N_{Si} = N_{Av} * n = \frac{N_{Av} * m}{M} = \frac{N_{Av} * \rho * V}{M}$$

$$= \frac{6{,}022136 * 10^{23}\left[\frac{1}{mol}\right] * 2{,}33\left[\frac{g}{cm^3}\right] * 1[cm^3]}{28{,}09\left[\frac{g}{mol}\right]} \qquad \textbf{Formel 3-5}$$

$$= 4{,}995 * 10^{22} \approx \underline{\underline{5 * 10^{22}}}\ Siliziumatome$$

Mit N_{Av} als Avogadro-Konstante befinden sich nach Formel 3-5 bei 300 K folglich rund $5{\cdot}10^{22}$ Siliziumatome in einem Kubikzentimeter eines Siliziumkristalls, oder anders ausgedrückt: Silizium besitzt $5{\cdot}10^{22}$ Siliziumatome je Kubikzentimeter.

Des Weiteren wurden aus der Anfangszeit des Bipolartransistors die Bezeichnungen Emitter für n-dotierte Schichten (Elektronen emittierende Schicht) und Basis für p-dotierte Schichten übernommen. Diese Begrifflichkeiten sollen nun auch hier Anwendung finden.

3.3 Evolution der kristallinen Siliziumsolarzelle

In diesem Kapitel soll die grundlegende Funktionsweise und der dadurch bedingte Aufbau von kristallinen Siliziumsolarzellen dargestellt werden. Weil die Entwicklung spezieller Solarzellen basierend auf kristallinem Silizium auch an den Fortschritt der Produktionsprozesse gebunden ist, wird zudem vorgreifend in diesem Kapitel die Evolution der kristallinen Siliziumsolarzellentechnologie mitbetrachtet. Prinzipiell wird die Gruppe der kristallinen Siliziumsolarzellen anhand der Herstellungsverfahren und Kristallanordnung, wie in Abbildung 3-3 dargestellt, unterschieden in monokristalline Siliziumsolarzellen, multikristalline Siliziumsolarzellen, Ribbon-Solarzellen und HIT-Zellen. Die HIT-Zelle ist allerdings eine Sonderform der kristallinen Solarzellen, da sie eine Mischtechnologie aus kristallinem und amorphem Silizium darstellt. Die Unterteilung in monokristalline und multikristalline Solarzellen folgt der herstellungsbedingten unterschiedlichen Kristallstruktur. Monokristalline Solarzellen besitzen einen Emitter und eine Basis aus einem Einkristall; bei multikristallinen Solarzellen besteht der Halbleiterkristall aus einem polykristallinen Gefüge. Weitere Informationen zur Kristallstruktur finden sich im Kapitel 4.5.2. Der sonstige Zellenaufbau beider Varianten ist indessen vollkommen identisch.

3.3.1 Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1960er

Eine typische Siliziumsolarzelle der ersten Generation besteht wie eine Photodiode aus einem unsymmetrisch dotierten pn^+-Übergang. Die infolge des inneren Photoeffektes generierten Elektronen-Loch-Paare können, je nach Entstehungsort (vgl. Kapitel 3.1: Der photovoltaische Effekt), durch das elektrische Feld der Raumladungszone „sortiert“ werden. Dabei gelangen die Elektronen durch den n^+-Emitter zu den Frontkontakten und die Löcher durch die p-Basis zum Rückkontakt. Wird ein Verbraucher zwischen die beiden Zellenpole geschalten, führt die entstandene Potentialdifferenz zum Entstehen einer elektrischen Spannung. Die Metallfinger (Frontkontakt) dienen dazu, die entstandenen Elektronen zu sammeln und zur Stromsammelschiene zu befördern. Einerseits werden sie werden möglichst dünn ausgeführt, um Wirkungsgradverluste durch Verschattung zu minimieren. Andererseits dürfen sie aber auch nicht zu dünn ausgeführt werden, da sie einen niedrig ohmschen Widerstand aufweisen sollten. Somit ergibt sich

ein Optimierungsproblem zwischen minimaler Abschattung und minimal geforderter Breite der Kontaktfinger. Übliche Breiten der Kontaktfinger bewegen sich nach [Mertens 2011, S. 108] zwischen 100 und 200 µm. Sie bestehen aus Silber, Aluminium oder einer Legierung aus Titan und Palladium. Die Antireflexionsschicht dient der Verringerung des reflektierten Anteils der auf die Zellenoberfläche treffenden Strahlung. Die folgende Abbildung stellt einführend den prinzipiellen Aufbau einer Standardsiliziumsolarzelle dar.

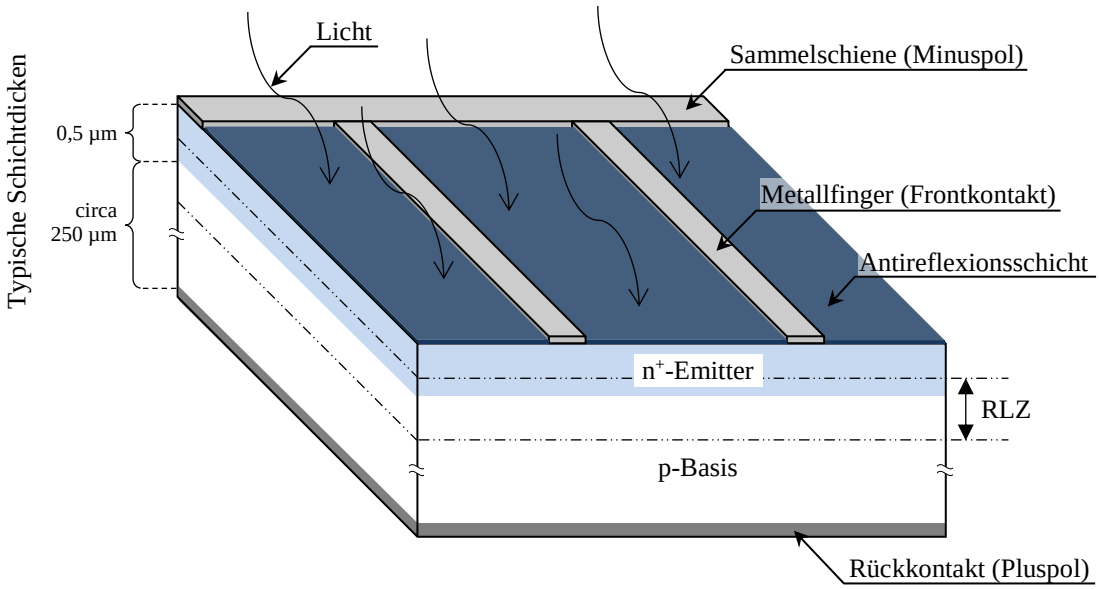


Abbildung 3-4: Detailausschnitt des Aufbaus einer Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1960er.

Der n^+-Emitter wird sehr dünn ausgeführt, damit möglichst viel infiltrierendes Licht in der Raumladungszone absorbiert werden kann und somit die Wahrscheinlichkeit eines Beitrags zum photovoltaischen Effekt optimal ist. Die Schichtdicke der p-Basis verändert sich ständig mit dem technischen Fortschritt. Ohne weitere technische Maßnahmen muss er jedoch mindestens 250 µm dick sein, da kristallines Silizium ein indirekter Halbleiter ist und deshalb einen geringen Absorptionskoeffizienten besitzt. Die Tendenz geht allerdings zu einer wesentlich dünneren Basis, da der Weg des infiltrierenden Lichtes durch technische Maßnahmen künstlich verlängert werden kann. Durch sinkende Schichtdicken reduziert sich zudem der Siliziumbedarf pro produzierter Zelle. Eine Maßnahme stellt die Nutzung eines optischen Reflektors am Zellenboden dar. Dieser führt dazu, dass Verluste durch Transmission für dünnere Schichtdicken reduziert werden, da der reflektierte Teil der Strahlung insgesamt mindestens zweimal durch die Schichten läuft. Als optischer Reflektor eignet sich schon der normale Rückseitenkontakt. Besteht er beispielsweise aus Aluminium (Reflexionsfaktor > 80%) kann der Transmissionsverlust bei dünneren Schichtdicken deutlich gesenkt werden.

Ein wichtiger zu betrachtender Effekt ist die Störstellenrekombination. Ähnlich der Störstellenleitung entstehen durch Kristallbaufehler oder Fremdatome zusätzliche Niveaus im Bändermodell. Diese führen dazu, dass generierte Elektronen einfacher aus dem Leitungsband in das Valenzband gelangen und so mit Löchern rekombinieren können. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit der Störstellenrekombination durch Fremdatome von der Fremdatomart und damit von der Lage des zusätzlichen Niveaus abhängig. [Mertens 2011, S. 85] Abbildung 3-5 zeigt die Lage der Energieniveaus der Störstellen durch Fremdatome in einem Siliziumkristall.

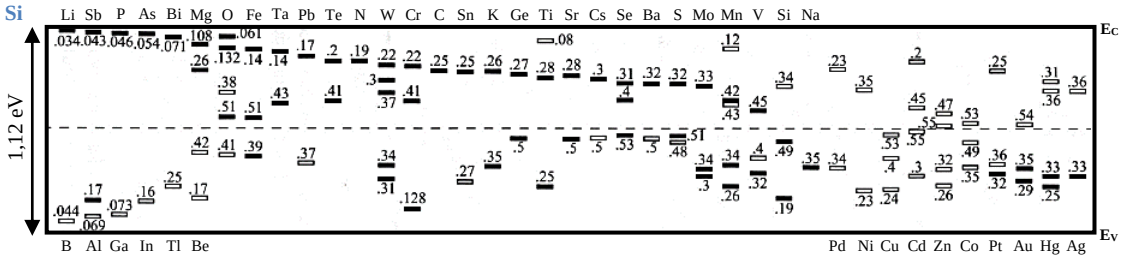


Abbildung 3-5: Lage der Störstellenenergieniveaus in Abhängigkeit des jeweiligen Fremdatoms in einem Siliziumkristall. Gefüllte Striche repräsentieren Donatorenlevel; hohle Striche Akzeptorenlevel. Level über der Mitte der Bandlücke geben die Differenz zum Leitungsband an, die unterhalb der Bandlückenmitte die Differenz zum Valenzband. Darstellung angelehnt an [Sze und Ng 2007, S.23].

Je weiter sich das durch das Fremdatom eingebrachte zusätzliche Niveau der Bandmitte nähert, desto höher ist die Rekombinationswahrscheinlichkeit. [Mertens 2011, S. 85] Diese Rekombinationszentren werden auch als Fallen bezeichnet, da sie dem gewünschten photovoltaischen Effekt entgegenwirken beziehungsweise diesen mindern. Aus diesem Grund wird zur Herstellung von Siliziumsolarzellen hochreines Silizium als Ausgangsstoff verwendet. Nähere Ausführungen, wie beispielsweise die geforderte Mindestreinheit, maximale Fremdatomkonzentrationen und die Aufbereitung des Ausgangsstoffes Silizium finden sich im Kapitel 4.5.2: „Siliziumaufreinigung und Ingotherstellung“ Neben dem Vorhandensein von Fremdatomen können auch Kristallversetzungen und leere Gitterplätze als Rekombinationszentren wirken. Des Weiteren wirkt die Kristalloberfläche als Störstelle, da die äußeren Atome keine Bindungspartner besitzen; die offenen Bindungen führen zur sogenannten Oberflächenrekombination. Dies ist flächenmäßig vor allem am Halbleiterkristall-Metall-Übergang der Fall. Mit der Weiterentwicklung der Zellentechnologie wurde zur Minderung des massiven Effektes der Oberflächenrekombination zwischen dem Halbleiterkristall-Metallrückkontakt-Übergang eine p^+-Schicht eingebracht.

3.3.2 Die frühe 1970er „violet cell“

Aufgrund des Konzentrationsgefälles zwischen p- und p^+-Schicht diffundieren Elektronen bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes aus der p-Basis in die p^+-dotierte Schicht. Die so in die p+-Schicht diffundierten Elektronen rekombinieren dort mit den Akzeptoratomen und bilden so eine ortsfeste negative Ladung. Das resultierende elektrische Feld wird als Back-Surface-Field (BSF) bezeichnet. Ähnlich der Raumladungszone wirkt das elektrische Feld als Barriere für freie Elektronen der p-Basis; die durch den Photoeffekt in der p-Basis generierten Elektronen werden so Richtung Raumladungszone reflektiert. Das Back-Surface-Field fungiert sprichwörtlich wie ein elektrischer Spiegel und reduziert so den Effekt der Oberflächenrekombination an der Zellenrückseite deutlich. [Mertens 2011, S. 88]

Ähnlich der Maßnahme zur Minderung des Effektes der Oberflächenrekombination zwischen Halbleiterkristall-Metallrückkontakt-Übergang wird dem gleichen Effekt am Halbleiterkristall-Metallfrontkontakt-Übergang entgegengewirkt. Zwischen n^+-Emitter und den Metallfingern (Frontkontakt) wird eine n^{++}-dotierte Schicht eingebracht. Durch das Konzentrationsgefälle zwischen n^+- und n^{++}-dotierter Schicht strömen freie Elektronen in den n^+-Emitter, wodurch in der n^{++}-dotierten Schicht ortsfeste positive Ladungen entstehen. Die sich so ausbildende Raumladungszone hält die Defektelektronen von den Kontakten fern und wird als Front-Surface-Field (FSF) bezeichnet. Durch die sehr hohe Dotierung der n^{++}-Schicht ($N_D = 10^{20}$ cm^{-3}) [Mertens 2011, S. 109] entsteht an den Frontkontakten ein sehr schmales Front-Surface-Field, das „von den Elektronen durchtunnelt werden kann.“ [Mertens 2011, S. 110] Da der Effekt der Oberflächenrekombination neben den Halbleiterkristall-Metallfrontkontakt-Übergängen auch an der restlichen Oberfläche der Zellenoberseite stattfindet, müssen diese Übergangsbereiche ebenfalls beeinflusst werden. Zur Minderung von Rekombinationseffekten an der Oberfläche des n^+-Emitters (nicht mit Frontkontakten bedeckte Oberflächenbereiche) werden die offenen Bindungen mit einem Oxid bedeckt und abgesättigt. In diesem Zusammenhang wird von der Passivierung der Oberfläche gesprochen. Das zur Passivierung genutzte Siliziumoxid (SiO) diente bei Siliziumsolarzellen der ersten Generation je nach Ausführung auch als Antireflexionsschicht. Entweder wurde eine dünne Siliziumoxidschicht (6-15 nm) zur Passivierung thermisch auf den n^+-Emitter aufgebracht und mit einer doppelten Antireflexionsschicht aus Zinksulfid (ZnS) und Magnesiumfluorid (MgF_2) bedampft, oder es wurde eine dickere Siliziumoxidschicht (bis

zu 110 nm) aufgebracht, die dann gleichzeitig als Passivierungs- und Antireflexionsschicht fungierte. Dient Siliziumoxid alleinig zur Passivierung der Zellenoberfläche, ist eine Schichtdicke von 6-15 nm zum einen dünn genug um die optischen Eigenschaften in Kombination mit einer Antireflexionsschicht nicht zu stören, zum anderen aber dick genug um die Zellenoberfläche ausreichend zu passivieren. [Szlufcik *et al.* 2003, S. 162] Seit den frühen 1970ern kamen neue Antireflexionsmaterialien zum Einsatz, wodurch sich der Ansatz einer getrennten Passivierungs- und Antireflexionsschicht durchsetzte. Die Verluste, die sich aus der Nutzung von Siliziumoxid als gemeinsame Passivierungs- und Antireflexionsschicht durch dessen Absorptionsfähigkeit für Licht der Wellenlänge < 500 nm ergaben, konnten so umgangen werden. Genutzt wurde neben Tantalpentoxid (Ta_2O_5) vor allem Titandioxid (TiO_2), welches der Zelle seine charakteristische Violettfärbung verlieh. [Green 2003, S. 257]

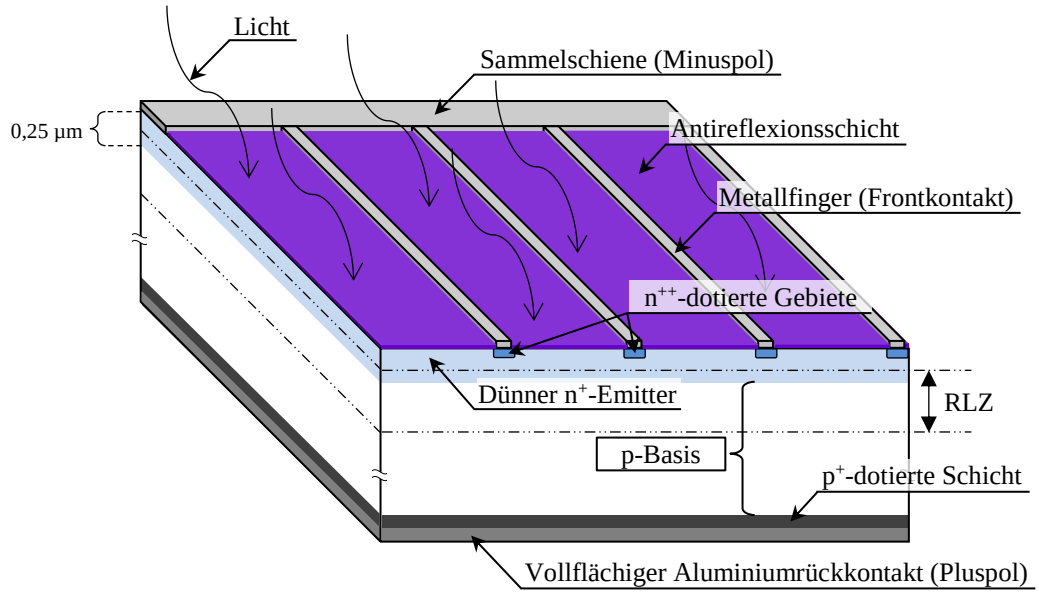


Abbildung 3-6: Detailausschnitt des Aufbaus einer Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1970er "violet cell".

Bis Mitte der 1990er wurde standardmäßig eine Kombination aus Siliziumoxid (Passivierung) und Titandioxid (Antireflexionsschicht) als Zellenoberflächenbeschichtung eingesetzt. Danach setzte sich infolge des technischen Fortschrittes wiederum die Nutzung einer einzelnen Schicht zur Passivierung und Reflexionsminderung durch. Bis heute werden dafür sogenannte PECVD (plasma-enhanced chemical vapour deposition, deutsch: plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung) hydrierte Siliziumnitride genutzt. Wie bereits im Kapitel 2.5.1: Antireflexionsbeschichtungen beschrieben, besitzt Siliziumnitrid (Si_3N_4) einen optimalen Brechungsindex und eignet sich zusätzlich hervorragend zur Passivierung der Zellenoberfläche. [Szlufcik *et al.* 2003, S. 162]

Fortschritte in der Produktionstechnologie ermöglichten es in den frühen 1970ern dünnere n^+-Emitter einzusetzen. Diese waren im Gegensatz zur ersten Generation doppelt so dünn, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit des Beitrags zum photovoltaischen Effekt durch ein im n^+-Emitter generiertes Ladungsträgerpaar erhöht (vgl.Formel 3-4). Weiter wurde durch den technischen Fortschritt die Verwendung von dünneren Metallfingern mittels der Fotolithografie möglich. Dadurch konnten Verschattungseffekte weiter gesenkt werden.

3.3.3 Chemically textured non-reflecting „black cell"

Eine weitere Möglichkeit die Reflexionsverluste auf der Zellenoberfläche zu minimieren besteht in deren Texturierung. Im Falle der isotropen Oberfläche einer monokristallinen Solarzelle kann diese durch anisotropes Ätzen so aufgeraut werden, dass sich eine zufällig verteilte Pyramidenstruktur ausbildet. Genutzt wird dazu eine Lösung aus 2 Gew.-% Kaliumhydroxid (KOH) oder Natriumhydroxid (NaOH) mit Zusätzen von Isopropanol (C_3H_8O). Wichtige Parameter wie beispielsweise eine geeignete Vorbereitung der Oberfläche, kontrollierte Temperaturbedingungen, eine genaue Lösungsdosierung und eine optimierte Isopropanolkonzentration beeinflussen diesen Prozess entscheidend. Durch die schwierig zu kontrollierenden Prozessparameter birgt der Ätzprozess Probleme wie sehr unterschiedliche Pyramidengrößen, adäquate Wiederholbarkeit und mögliche Fehlstellen (untexturierte Bereiche) in sich. [Szlufcik *et al.* 2003, S. 158] Läuft der Prozess kontrollier ab, entstehen spitz zulaufende (Winkel in der Spitze: 70,5°) Pyramiden mit einer quadratischen Grundfläche. Abbildung 8 zeigt eine durch anisotropes Ätzen generierte Oberfläche einer monokristallinen Solarzelle unter dem Rasterelektronenmikroskop.

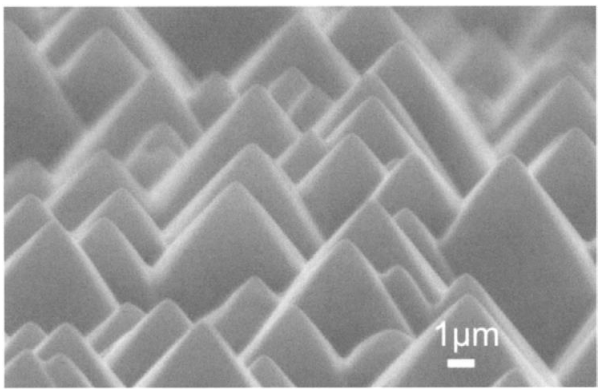


Abbildung 3-7: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer durch anisotropes Ätzen zufällig texturierten Zellenoberfläche. Abbildung aus [Szlufcik *et al.* 2003, S. 158].

Trifft Licht auf solch eine strukturierte Oberfläche, dringt, in Abhängigkeit des Reflexionsfaktors *R*, ein Teil der Strahlung in den Körper ein. Der nicht in den Körper eindringende Strahlungsanteil (reflektierte Strahlung) kann, bedingt durch die Pyramidenstruktur und wie in der nachstehenden Abbildung aufgezeigt, nochmals auf die Zellenoberfläche treffen, wobei wieder ein Teil der anfänglich reflektierten Strahlung in den Körper einzudringen vermag.

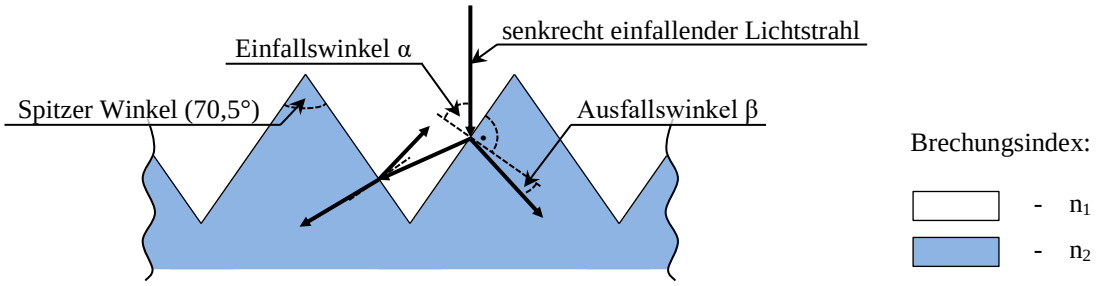


Abbildung 3-8: Wirkung einer texturierten Zellenoberfläche auf den reflektierten Strahlungsanteil.

Der materialspezifische Reflexionsfaktor *R* wird nach den Fresnel'schen Formeln in Abhängigkeit des Einfallswinkels α wie folgt bestimmt werden [Mertens 2011, S. 107]:

$$R(\alpha) = \left(\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}\right)^2$$ **Formel 3-6**

wobei der Ausfallswinkel β über das Brechungsgesetz ermittelt wird:

$$n_1 * \sin\alpha = n_2 * \sin\beta$$ **Formel 3-7**

Durch die Texturierung kann der reflektierte Strahlungsanteil, wie in Abbildung 3-8 dargestellt, abermals auf die Zellenoberfläche treffen und geht so nicht komplett für die Absorption in der Solarzelle verloren. Reines Silizium reflektiert rund 35 % der einfallenden Strahlung [Szlufcik *et al.* 2003, S. 157]. Die Texturierung der Zellenoberfläche senkt den Reflexionsfaktor auf circa 10 %. Eine weitere Senkung der Reflexionsrate kann zusätzlich mittels einer Antireflexionsbeschichtung (bspw. Si_3N_4) erreicht werden. Tabelle 3-6 gibt eine Übersicht der mittleren Reflexionsfaktoren *R* in Abhängigkeit der genutzten Möglichkeiten zur Minderung von Reflexionsverlusten.

Tabelle 3-6: Mittlere Reflexionsraten R für Silizium in Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung.

		Mittlerer Reflexionsfaktor R
Art der Oberflächen-behandlung	**Keine Oberflächenbehandlung**	35 %
	Nur Antireflexionsschicht (Si_3N_4)	10 %
	Nur Texturierung	10 %
	Texturierung und Antireflexionsschicht (Si_3N_4)	~ 3 %

Ein weiterer positiver Effekt der Oberflächentexturierung resultiert daraus, dass das einfallende Licht durch die schräge Oberfläche und der Brechung zum Lot hin nicht senkrecht durch die Zelle läuft. Dies bewirkt eine künstliche Verlängerung des Strahlungsweges durch den Halbleiter im Mittel um den Faktor 1,35 verglichen mit einem Halbleiter der gleichen Schichtdicke und einer unbehandelten Oberfläche. [Green 2003, S. 257] Der Effekt ist äquivalent zu einem um den Faktor 1,35 erhöhten Absorptions-koeffizienten oder einer um den gleichen Faktor dickeren Halbleiterschicht.

Neben der Minderung der Reflexionsverluste an der Zellenoberfläche erschwert eine Texturierung den Strahlungsaustritt des von der Zellenrückseite (optischer Reflektor → Zellenrückkontakt aus Aluminium) reflektierten Strahlungsanteils. Der Effekt des auf diesem Weg künstlich „eingefangenen“ Lichtes wird als Light Trapping bezeichnet. Die folgende Abbildung soll die beschriebenen Vorgänge des Light Trapping nochmals verdeutlichen.

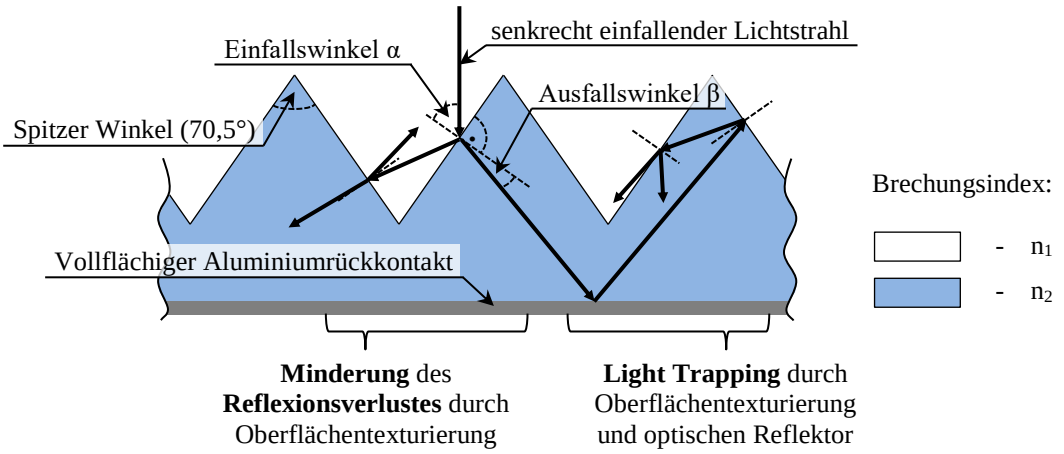


Abbildung 3-9: Light Trapping in einer texturierten Siliziumsolarzelle mit optischen Reflektor an der Zellenrückseite.

Ohne die künstliche Beeinflussung des Strahlungsweges durch die Zelle kann Licht einer Wellenlänge von 1.000 nm die heute übliche Zellendicke einer kristallinen Siliziumzelle von 150-200 µm bereits durchdringen. So verhindert Light Trapping vor allem für Licht der Wellenlänge im Bereich von 750 nm bis 1.000 nm (roter bis infraroter Spektralbereich) Durchstrahlungsverluste und führt zu einer Erhöhung der Absorptionsraten. [Mertens 2011, S. 109] In Kombination mit einem perfekten optischen Reflektor auf der Modulunterseite kann Light Trapping im Idealfall die Lichtintensität in einer Solarzelle um den Faktor n^2 im Vergleich zur außen vorherrschenden Strahlungsintensität erhöhen. Dabei stellt n den Brechungsindex des betrachteten Materials dar. Laut [Markvart 2003, S. 81], [Yablonovitch und Cody 1982, S. 300] und [Yablonovitch 1982, S. 899] bewirkt ein ideales Light Trapping eine Wegverlängerung der eintretenden Strahlung im Halbleiter um den Faktor $4n^2$ multipliziert mit der Zellendicke als einfache Weglänge.

Light Trapping führt, wie eben beschrieben, in einer kristallinen Siliziumsolarzelle durch den künstlich verlängerten Strahlungsweg zu einer deutlich besseren Absorbtionsfähigkeit für Licht einer Wellenlänge im Bereich von 750 bis 1.000 nm. Dies ermöglichte die Konstruktion von Solarzellen mit einer dünneren p-Basis (circa 250 µm bei der Standardzelle im Vergleich zu 150 – 200 µm bei der chemically textured non-reflcting „black cell“) ohne Einbußen bei der Qualität der Lichtabsorption. Light Trapping stellt somit einen wichtigen Faktor zur Produktion von dünnen und damit materialsparenden kristallinen Siliziumsolarzellen dar.

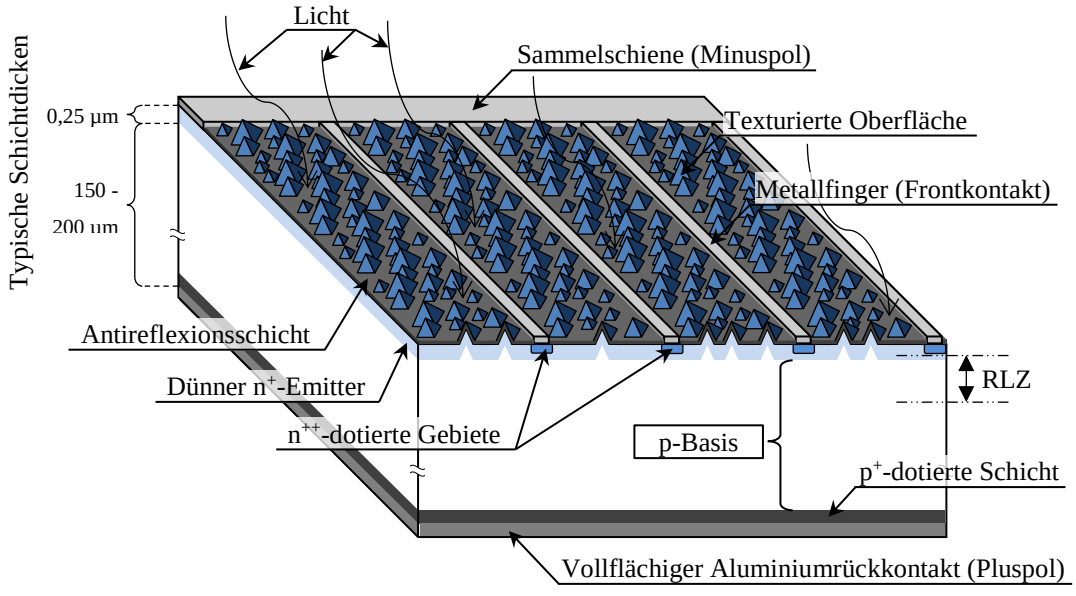


Abbildung 3-10: Detailausschnitt des Aufbaus einer chemically textured non-reflecting "black cell".

Die Neuerungen der textured non-reflecting „black cell“ und der „violet cell“ wie:

- eine Antireflexionsbeschichtung,
- das BSF,
- das FSF[3],
- ein dünner n^+-Emitter,
- schmale Frontkontakte,
- die Passivierung der Zellenoberfläche und
- die Texturierung der Zellenoberseite

stellen die Grundlage der heute mittels des Siebdruckverfahrens hergestellten Standard-siliziumzelle dar. Weiterentwicklungen in der Zellentechnologie brachten seit Mitte der 1980er auch weiterhin neue und innovative Zellenkonzepte hervor. Diese speziellen Zellen finden aber aufgrund ihrer schwierigen Herstellungsprozesse und der damit verbundenen hohen Herstellungskosten kaum Anwendung. So werden diese sogenannten Hocheffizienzzellen trotz ihrer höheren Wirkungsgrade zurzeit nur in Pilotanlagen oder im labortechnischen Maßstab produziert.

[3] Findet bisher in der kommerziellen Produktion einer kristallinen Standardsiliziumzelle nur partiell Anwendung.

3.3.4 Hocheffizienzzellen

3.3.4.1 Buried-Contact-Zelle

Eine der bekanntesten Weiterentwicklungen ist die in vielen Ländern patentierte Buried-Contact-Cell (kurz: BCC). Sie wurde 1985 von Herrn Professor Martin A. Green an der University of New South Wales (UNSW) in Australien entwickelt.

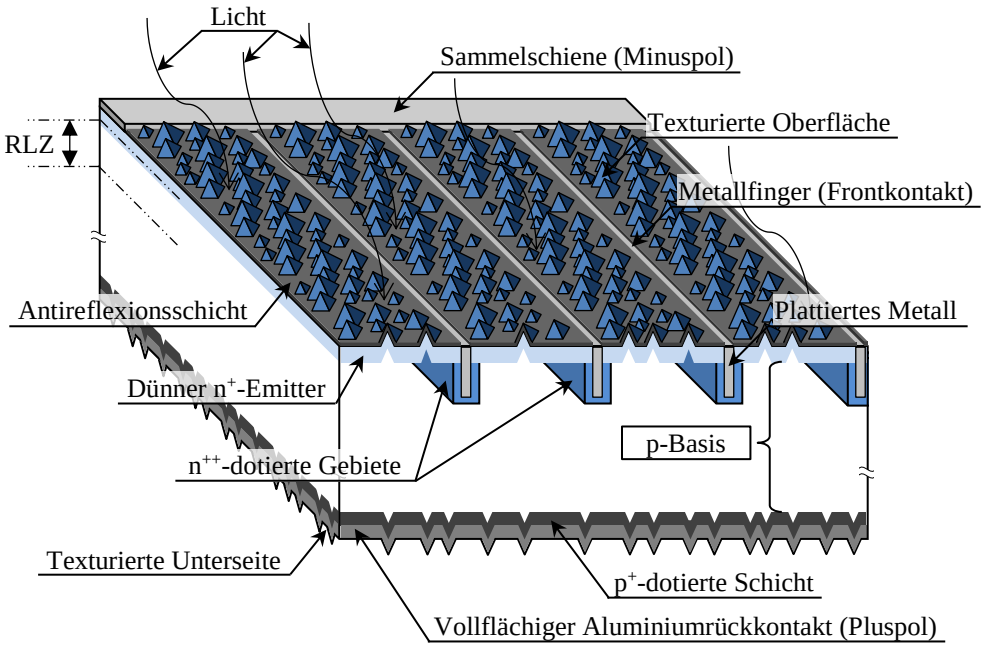


Abbildung 3-11: Detailausschnitt des Aufbaus einer Buried-Contact-Zelle.

Die Buried-Contact-Cell besitzt alle technischen Errungenschaften ihrer Vorgänger. Zusätzlich weist sie jedoch zwei entscheidende Neuerungen auf. Zum einen besitzt sie neben der texturierten Zellenoberseite auch eine texturierte Zellenunterseite. Dies verlängert abermals den Strahlungsweg durch die Zelle nochmals und führt so zur besseren Absorptionsfähigkeit für langwelliges Licht und einer Erhöhung des Light Trapping.

Der zweite und gravierendere Unterschied, wie aus Abbildung 3-11 deutlich zu entnehmen ist, liegt in der Gestaltung der Frontkontakte. Anstatt „liegend“ werden diese nun „stehen“ ausgeführt. Während es bei der liegenden Ausführung einen optimalen Kompromiss zwischen minimalen Verschattungsverlusten, vor allem bei schräg einfallendem Licht, und minimal geforderter Breite der Kontaktfinger (niedrig ohmscher Widerstand) zu finden gilt, wird dies bei der „stehenden“ Ausführung umgangen. Dazu werden die Kontaktfinger „eingegraben“. Auf diese Weise können sie für niedrig ohmsche Widerstände dick (hoch) genug, gleichwohl aber für minimale Verschattungs-

verluste (circa 3 %) sehr dünn ausgeführt werden [Goetzberger und Hoffmann 2010, S. 35]. Dazu werden meist mittels eines Lasers Gräben einer Breite von circa 20 µm und einer Tiefe von bis zu 100 µm in die texturierte Oberfläche eingefräst. Neben dem lasergestützten Einfräsen gibt es weitere Möglichkeiten wie beispielsweise mittels mechanischen Schneidewalzen oder anderen chemischen und mechanischen Ansätzen. Die Variante der lasergefrästen Gräben ist allerdings die meistgenutzte, weshalb die Zelle auch als Laser Grooved Buried Contact Zelle (LGBC-Zelle) bezeichnet wird. Wie eben beschrieben, äußert sich das vergraben der Kontaktfinger in zwei Vorteilen. Durch eine bis zu 5-mal größere Höhe als Breite können die Verschattungsverluste und der ohmsche Widerstand minimiert werden. Nach dem Reinigen der Gräben durch chemisches Ätzen wird die hoch dotierte n^{++}-Schicht durch eine hochdosierte Phosphordiffusion um die Gräben angelegt. Diese dient wie bei der Violet-Cell zur Bildung des FSF. Danach wird plattiertes Metall aus einem Nickel-, Kupfer- und Silbergemisch durch eine chemische Oxydationsreaktion eingebracht. Diese Technik reduziert den Widerstand zwischen dem gesinterten Nickel und dem Emitter um das 10-fache, verglichen zu einem siebgedruckten Kontakt. [Rubin 2010, S. 122]

Das BCC-Zellenkonzept wurde von der Firma BP Solar unter dem Namen Saturnzelle in die Massenproduktion überführt. Des Weiteren wurden diese Zellen in einem Pilotprojekt von Telefunken im Siegerauto der World Solar Challenge von 1990 (einem Autorennen für solarbetriebene Vehikel von Darwin bis Adelaide) verbaut, was die Leistungsfähigkeit dieses Zellendesigns wirkungsvoll unterstrich. [Mertens 2011, S. 111], [Green 2003, S. 270]

3.3.4.2 Rückkontaktzelle

Einen anderen Ansatz verfolgt das innovative Zellkonzept der Rückkontaktzelle. Durch die Arbeiten der Forschergruppe um Herrn Ronald A. Sinton an der Stanford University ging die Rückkontaktzelle als eine Weiterentwicklung aus der 1975 von Herrn. Prof. Richard J. Schwartz erfundenen „Interdigitated Back Contact Cell“ (kurz: IBC-Zelle) hervor. Laut [Szlufcik *et al.* 2003, S. 173] und [King *et al.* 1989] wurden ursprünglich das IBC-Zellendesign und die Rückkontaktzelle als Hocheffizienzzellen für Konzentratorsysteme entwickelt. Beide haben die Elimination jeglicher Verschattungsverluste auf der beleuchteten Zellenoberfläche gemeinsam. Dafür wurden die Metallkontakte (Plus- und Minuskontakte) auf die Zellenrückseite verlegt. Somit entfällt die

Optimierung, beziehungsweise Abwägung zwischen minimalen Verschattungseffekten und minimaler Breite der Kontaktfinger. Weiterer Effekt ist die voneinander unabhängige Optimierbarkeit der optisch relevanten Zellenvorderseite und der elektrisch relevanten Zellenrückseite. Infolge der homogenen Frontseite und der sich daraus ergebenden ästhetischen Vorteile der Zellen wurde das Interesse der Industrie an der Entwicklung eines kostengünstigen und für normale Strahlungsverhältnisse verwendbaren Zellenkonzeptes geweckt. [Szlufcik *et al.* 2003, S. 174] Aus diesen Bestrebungen gingen weitere Zellkonzepte wie etwa die Emitter Wrap Through (EWT) – Solarzellen, die Metallisation Wrap Through (MWT) – Solarzellen und die Emitter Wrap Around (MWA) – Solarzellen hervor. Diese Zellenkonzepte finden derzeit praktisch keine Anwendung, allenfalls in Spezialanwendungen oder Forschungsprojekten. Weiterführende Informationen diesbezüglich finden sich in: [Szlufcik *et al.* 2003, S. 174f] und [Zechner 1999, S. 70ff]

Abbildung 3-12 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Rückkontaktzelle.

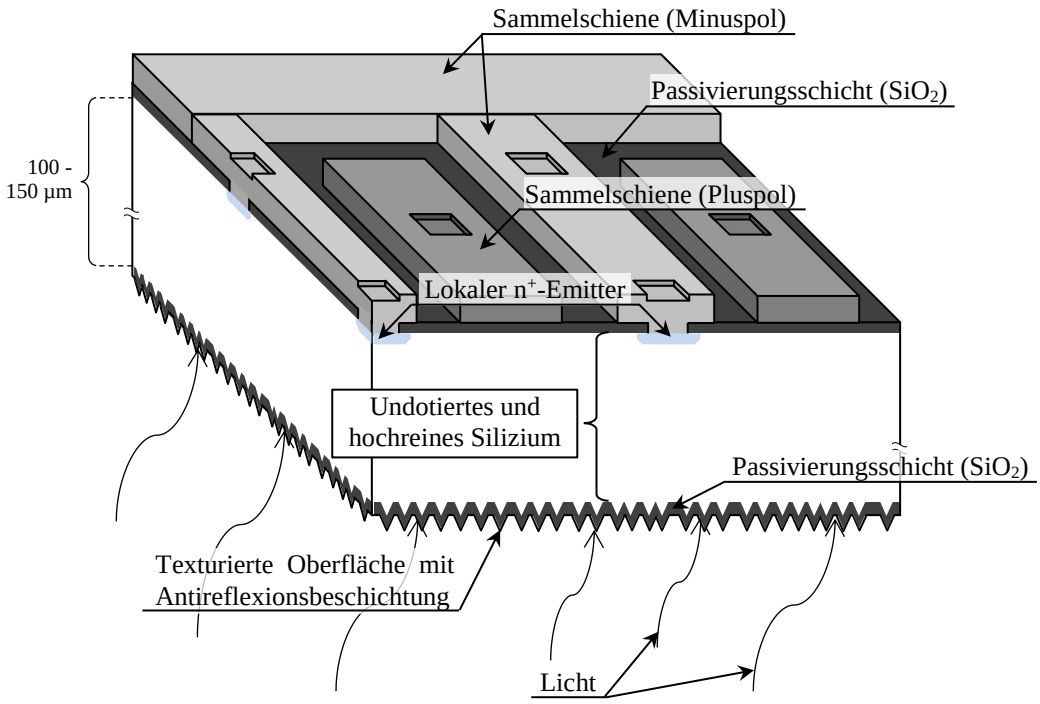


Abbildung 3-12: Detailausschnitt des Aufbaus einer Rückkontaktzelle.

Aufgrund der Bauweise der Zelle müssen zwei Besonderheiten bei der Produktion beachtet werden. Zum einen wird sehr reines Silizium einer hohen Qualität (wenig Kristallgrenzen) benötigt, da die Diffusionslänge der Ladungsträger mindestens fünfmal länger sein sollte, als die Zelle dick ist. Dafür wird ein Substrat mit Ladungsträger-

lebenszeiten größer als 1 ms verwendet. [Verlinden 2003, S. 438] Dies ist notwendig, damit ein möglichst großer Teil an generierten Ladungsträgern (selbst nahe der Vorderseite) durch die Basis bis zur Zellenunterseite diffundieren kann, um letztendlich an der Rückseite eingesammelt zu werden und so gute Zellwirkungsgrade zu ermöglichen. Neben der Verwendung von hochreinem Silizium müssen die Oberflächen bestmöglich passiviert werden. Anfangs wurde dafür sowohl für die Vorderseite als auch für die Rückseite Siliziumoxid verwendet. Mit dem technischen Fortschritt erhielt auch bei diesem Zellenkonzept die Nutzung von Siliziumnitrid zur Passivierung und gleichzeitigen Nutzung als Antireflexionsschicht auf der Zellenvorderseite Einzug (vgl. Kapitel 3.3.3: Chemically textured non-reflecting „black cell"). Die Passivierungsmaßnahmen der Zellenoberflächen sind von außerordentlicher Bedeutung, da bei Standardrückkontaktzellen für Strahlungsverhältnisse bis zur fünffachen Normalstrahlung die Oberflächenrekombination den dominanten Rekombinationsmechanismus darstellt. [King *et al.* 1989] Obwohl die Zellkonzepte der rückseitigen Kontaktierung ursprünglich für Konzentratorsysteme entwickelt wurden, konnte das Zelldesign durch das Hinzufügen einer n^+-dotierten Schicht zwischen Basis und Passivierung auf der beleuchteten Zellseite für normale Strahlungsstärken angepasst werden. Durch das Hinzufügen dieser n^+-dotierten Schicht entsteht ein FSF, dass die gleiche Funktionsweise wie ein BSF konventioneller $n^+/p/p^+$-Solarzellen besitzt und so zusätzlich der Oberflächenrekombination entgegenwirkt. [King *et al.* 1989], [Verlinden 2003, S. 438f]

Im Gegensatz zu IBC-Zellen besitzen Rückkontaktzellen einen kleineren Metallkontakt und eine reduzierte Emitterfläche. Dafür wird ein spezielles Verfahren verwendet. Die mit der Passivierungsschicht überzogene Zellenrückseite wird an bestimmten Stellen mittels eines Lasers durchbohrt. Darin wird anschließend ein lokaler n^+-Emitter eindiffundiert, wodurch die Oberflächenrekombinationen an den Halbleiterkristall-Metallkontakt-Übergängen auf ein Minimum reduziert werden können. So betragen typische Werte der Fläche des Halbleiterkristall-Metallkontaktes, in Abhängigkeit vom Widerstand, weniger als 1 % an der Gesamtfläche der Zellenrückseite. Je nach Anwendungsgebiet und Konfiguration kann die Basis aus undotiertem Silizium [Partain 2010, S. 90], n^--dotiertem Silizium [Partain 2010, S. 86], n-dotiertem Silizium [Mertens 2011, S. 111], oder p-dotiertem Silizium [Partain 2010, S. 85] bestehen. Die flächigen Metallfinger und Sammelschienen auf der Zellenrückseite werden mit Aluminium ausgeführt, da sie so zusätzlich als optischer Reflektor fungieren. Durch die texturierte Oberfläche

und den optischen Reflektor nutzt die Rückkontaktzelle ebenfalls Light Trapping zur Erhöhung der Lichtabsorptionsraten. Die Firma SunPower hat dieses Zelldesign zur Marktreife weiterentwickelt und vertreibt es unter dem Namen A-300.

3.3.4.3 PERL-Zelle

Beginnend 1989 wurde an der University of New South Wales in Australien durch die Arbeitsgruppe um Herrn Professor Martin A. Green an einem weiteren Hocheffizienzzellendesign geforscht: der PERL-Zelle (passivated emitter, rear locally-diffused). Das Konzept der PERL-Zelle ist eines der effizientesten Abwandlung der auf kristallinem Silizium basierenden einschichtigen Solarzellentechnologien für Anwendungen unter dem globalen Standardsolarspektrum. Ausgenommen eines veränderten und hocheffizienten Light Trappings und der Ausführung der Metallkontakte besitzt die PERL-Zelle viele Gemeinsamkeiten mit der Technologie der Rückkontaktzelle. Dazu zählen eine fast vollständige Umhüllung der Zellenober- und Unterseite mittels einer Passivierungsschicht und kleine Kontaktbereiche, die durch eine starke Dotierung passiviert werden. Die folgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau der Wirkungsgradrekordzelle nach dem PERL-Design

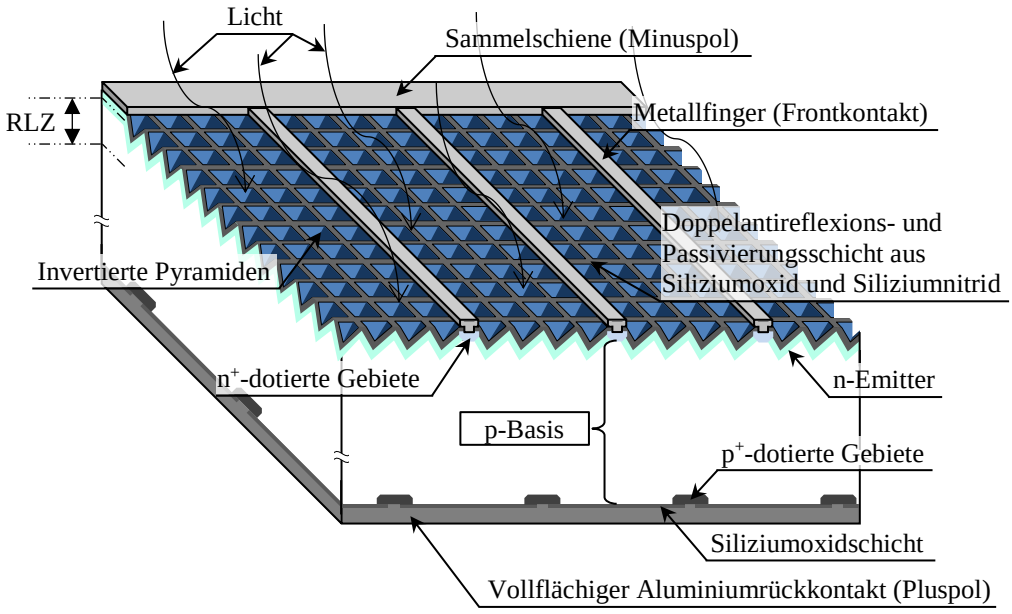


Abbildung 3-13: Detailausschnitt des Aufbaus einer PERL-Zelle.

Diese besteht aus einer rund 200 µm dicken p-dotierten Siliziumbasis. Auf der Vorderseite sind dünne Metallfinger aufgebracht (minimale Verschattungsverluste), die nur einen sehr kleinen Kontakt zu den lokal stark dotierten Emitterregionen besitzen. Dies dient der Minimierung von Rekombinationsverlusten an der Emitteroberfläche. Für eine gute Oberflächenpassivierung wird eine geringe Oberflächendotierung benötigt. Auf der anderen Seite kann eine gut leitende Verbindung nur an hochdotierten Regionen erfolgen, was eine hohe Oberflächenrekombination zur Folge hat. Dieser Zwiespalt führte zu klar abgegrenzten lokal dotierten Kontaktregionen auf der lichtzugewandten Zellenseite. [Goetzberger und Hoffmann 2010, S. 34] Wie aus der Abbildung 3-13 zu entnehmen ist, nutzt die Zelle zusätzlich das Prinzip von punktuell eingebrachten Rückseitenkontakten. Die Basiskontakte der Zellenrückseite sind aus dem gleichen Grund wie die Zellenvorderseitenkontakte begrenzt und von einer stark p-dotierten Region lokal umgeben. Das PERL-Zellendesign nutzt folglich zur Minimierung der Halbleiterkristall-Metallkontakt-Rekombinationseffekte ein local back surface field (LBSF). Die Zellenrückseite besteht aus einem vollflächigen Aluminiumkontakt, der durch eine Siliziumoxidschicht (SiO) von den nicht lokal kontaktierten Bereichen der Basis getrennt ist. Die Passivierungsschicht dient somit der Unterbindung von Halbleiterkristall-Metallkontakt-Rekombinationseffekten.

Für eine optimale Zellperformance sollte so viel Licht der nutzbaren Wellenlängen wie möglich in die Zelle geführt und dort absorbiert werden. Das PERL-Design nutzt dafür vor allem technische Besonderheiten optischer Natur.

Die texturierte Oberfläche der optisch relevanten Zellenoberseite verfügt über solche speziellen optischen Eigenschaften in Form von invertierten Pyramiden. Das einfallende Licht beleuchtet mindestens eine der Pyramidenwände, wodurch der größte Anteil des auf die Oberfläche treffenden Lichtes in die Zelle gelenkt wird. Der an den Pyramidenwänden reflektierte Strahlungsanteil wird Richtung Zelleninneren reflektiert. In Folge dessen trifft er in seinem Strahlungsverlauf auf mindestens eine weitere Pyramidenseite, sodass er zumindest eine weitere Chance erhält in die Zelle einzudringen. Trifft das Licht nahe der Pyramidenspitze auf eine der Wände, können durch die spezielle Geometrie bis zu drei solcher Chancen für den reflektierten Anteil generiert werden. In die Zelle eingedrungenes Licht durchläuft diese schräg, was sich in einem künstlich verlängerten Strahlungsweg durch die Zelle äußert. Dabei wird in der circa 200 µm dicken p-dotierten Basis ein Großteil der Strahlung absorbiert. Der in Folge des Absorptions-

verhaltens der p-Basis (indirekter Halbleiter) nur schwach absorbierte Strahlungsanteil wird nach Durchlaufen der Basis am Zellenboden reflektiert. Wie oben beschrieben setzt sich der Zellenboden aus einem vollflächigen Aluminiumkontakt in Kombination mit einer Passivierungsschicht aus Siliziumoxid zusammen. Diese Kombination wirkt als sehr effizienter optischer Reflektor. Die Güte der Reflektion am Zellenboden ist neben der Dicke der Oxidschicht vom Einfallswinkel der Strahlung abhängig. Der Reflexionsfaktor bewegt sich, je nach Einfallswinkel, zwischen 90 und 100 %. [Green 2003, S. 262]

Das von der Zellenrückseite zurückgeworfene Licht wird abermals an der speziell texturierten Zellenoberseite teils reflektiert. Der nach dem zweimaligen Durchlaufen der Basis an der Zellenoberseite nicht reflektierte Strahlungsanteil kann durch das Design der invertierten Pyramidenstruktur in Verbindung mit dem Brechungsgesetz wiederum die Zelle infiltrieren. Dieses Verhalten und die innere Reflexionsrate an der Zellenoberseite können durch eine veränderte Strukturierung positiv beeinflusst werden. Dazu wird die symmetrische Oberfläche gestört, indem einige inverse Pyramiden schräg ausgeführt werden. Das hocheffiziente Light Trapping der PERL-Zelle, bestehend aus der mit inversen Pyramiden strukturierten Zellenoberseite und dem optischen Reflektor an der Zellenunterseite, kann so zu einer effektiven Wegverlängerung der infiltrierenden Strahlung um einen Faktor größer als 40 führen. Diese künstliche Wegverlängerung erhöht vor allem die Absorptionsfähigkeit von Strahlung im infraroten Bereich. Die texturierte Zellenoberseite ist mit einer Doppelantireflexionsschicht bedeckt, die sich aus einer sehr dünnen Schicht Siliziumoxid und einer Schicht Siliziumnitrid zusammensetzt. 1999 erreicht das Zellendesign im Labor den Rekordwirkungsgrad von 25 %. [Green *et al.* 2013, S. 828] (1996 waren es noch 24,2 %). [Sollmann 2009]

Seit 2003 ist Suntech Power Co. Ltd. mit an der Entwicklung beteiligt. Da die Herstellung der Rekordwirkungsgradzelle circa 100 Prozessschritte benötigt und dies einen inakzeptablen Aufwand für eine industrielle Produktion darstellt, hat Suntech das Grundkonzept des Zelldesigns vereinfacht. Die Änderungen belaufen sich hauptsächlich auf:

- die Antireflexionsdoppelschicht auf der beleuchteten Zellenseite: Die Zellenoberseite wird nur mit einer Schicht, bestehend aus Siliziumnitrid, passiviert (dient wie bei anderen konventionellen Zellen als Antireflexions- und Passivierungsschicht zugleich). Trotz der Nutzung nur einer Schicht liegt der Reflexionsfaktor der Zellenoberseite, bedingt durch die Kombination mit der speziellen Strukturierung, bei nur rund einem Prozent.

- die Vollkontaktierung der Zellenrückseite: Anstelle von Punktkontakten und der Nutzung eines LBSF ist die Basis über ein BSF vollflächig mit dem Rückkontakt verbunden.

Weiter hat Suntech ein neues Verfahren zum Einbringen der Frontkontakte entwickelt. So werden durch ein spezielles Herstellungsverfahren sehr dünne Gräben (~ 10 µm breit) in die Siliziumnitridschicht eingebracht. Zur Unterdrückung von Rekombinationseffekten am Halbleiter-Metall-Übergang erfolgt in den Gräben eine n^{++}-Dotierung des Siliziums. In einem zweiten Schritt werden die Gräben mit Silber oder einer Silber-Kupfer-Legierung gefüllt und ergeben so die Leiterbahnen. Die Emitter sind dabei nur rund 20 – 25 µm breit (~ fünfmal so breit wie ein menschliches Haar, jedoch nur 1/5 der Breite der Kontakte, die bislang auf Suntechzellen aufgebracht wurden). Auf diese Weise sind nur noch rund 4 % der Zellenoberfläche durch die Kontaktfinger verschattet, anstatt wie bisher 10 %. Auch der Abstand zwischen den Leiterbahnen hat sich verändert. Statt der bisher üblichen 3 mm liegen diese nun nur noch 1 mm auseinander. Dadurch wird für generierte Ladungsträger die Zeit für eine mögliche Rekombination gesenkt. Durch die dünneren Leiterbahnen wird außerdem die Grenzfläche zwischen Silizium und Metallkontakt reduziert, was die Rekombinationswahrscheinlichkeit weiter senkt. [Sollmann 2009]

Das so für die industrielle Produktion vereinfachte Grundkonzept der Rekord-PERL-Zelle äußert sich zwar zu Lasten des Wirkungsgrades, verringert aber die Herstellungskosten. Das von Suntech weiterentwickelte Zellenkonzept wird unter dem Namen Pluto vertrieben. Mittlerweile besitzen die industriell gefertigten Zellen einen Rekordwirkungsgrad von 20,3 % für die monokristalline Variante. Der Wirkungsgrad der multikristallinen Variante liegt etwas niedriger. Die Unterschiede im Wirkungsgrad zwischen multi- und monokristallinen Siliziumzellen bedingt sich in der wesentlich höheren Anzahl an Rekombinationszentren durch Kristallgrenzen.

3.3.5 Betrachtungen zum Wirkungsgrad kristalliner Siliziumsolarzellen

1954 wurde die erste echte Siliziumsolarzelle mit einem Wirkungsgrad von 6% der Öffentlichkeit vorgestellt. Sie wurde durch die Herren Darly Chapin, Calvin Fuller und Gerald Pearson (Bell Laboratories, New Jersey) entwickelt. Diese sogenannte Bell-Zelle gab den Startschuss für intensive Forschungsarbeiten um den photovoltaischen Effekt und führte zu diversen innovativen Zellendesigns. Wie im vorherigen Kapitel aufgezeigt, verdanken die unterschiedlichen Zelldesigns ihre Wirkungsgradrekorde verschiedensten technologischen Neuerungen. Deshalb soll im Folgenden die Evolution der im Labor erreichten Rekordwirkungsgrade von Siliziumsolarzellen fokussiert werden. Zur Wahrung der Vergleichbarkeit sind alle angegebenen Rekordwirkungsgrade auf Messungen im Labor unter Standardtestbedingungen bezogen.

3.3.5.1 Historische Entwicklung

Die Ende der 1950er im Labor gefertigte Spitzentechnologie taugte nicht zur kommerziellen Nutzung. Durch die hohen Herstellungskosten blieb sie Spezialanwendungen wie der Raumfahrt (Satelliten mit Solarzellen: erster Satellit mit Solarzellen war der amerikanische Satellit Vanguard 1) vorbehalten. Die Möglichkeit der Nutzung des photovoltaischen Effektes zur direkten Erzeugung von elektrischer Energie beflügelte die Wissenschaft. So konnte der Wirkungsgrad von Laborsolarzellen in den folgenden zwei Jahren auf über 10 % gesteigert werden. [Green 2003, S. 255] Nach dieser beeindruckenden initialen Entwicklungsperiode wurde in den frühen 1960er Jahren eine Standardzelle entworfen, die das Zelldesign für die nächsten 10 Jahre bestimmte und die Grundlage für die heutigen Hocheffizienzzellen darstellt: die Standard Space Silicon Cell der frühen 60er Jahre. Sie nutze schon erste Antireflexionsbeschichtungen zur Senkung der Reflexionsverluste. Als im Laufe der 1960er die positiven Effekte, die durch eine Rückkontaktierung mittels Aluminium in der Solarzellentechnologie einhergehen, verstanden wurden, gab dies den Anstoß zur Entwicklung weiterer Zellendesigns. Durch den Fortschritt in der Produktionstechnologie und dem fortschreitenden wissenschaftlichen Verständnis zu den Vorgängen und Verlusten bei der lichtinduzierten Ladungsträgertrennung, sowie der Verwendung neuerer Materialien (beispielsweise TiO_2 als Antireflexionsmittel) wurde 1973 ein neuer Laborwirkungsgradrekord aufgestellt.

Dafür wurden neben der Nutzung eines vollflächigen Aluminiumrückkontaktes ein BSF, ein FSF und eine neue Zusammensetzung der Antireflexionsschicht verwendet. Um die technologischen Neuerungen nutzen zu können, wurde das grundlegende Zellkonzept überarbeitet. Die so entwickelte Violet-Cell verdankt ihrem Namen der Wirkung des TiO_2 als Antireflexionsschicht (vgl. Beschreibung der frühen 1970er „violet cell“ im Kapitel 3.3.2) und erbrachte einen Rekordwirkungsgrad von 16 %.

Kurz nachdem Wirkungsgradrekord durch die Violet-Cell bekam die Solarzellen-technologie einen weiteren Performanceschub durch die Nutzung von Light Trapping. Die dafür notwendige Oberflächentexturierung wurde erstmals in der „chemically textured non-reflecting black cell“ verwendet und führte 1975 zu einer Steigerung des Wirkungsgrades auf 17,2 %. Seit dem Bekanntwerden der positiven Effekte durch Light Trapping nutzt fast jedes nachfolgende Zelldesign, ausgenommen Spezialzellen, diese bauartbedingten Vorteile. Gleichwohl werden die durch den Einbau eines vollflächigen Aluminiumrückkontaktes in Verbindung mit einem FSF und einem BSF nutzbaren Wirkungsgradverbesserungen für fast alle nachfolgenden Zelldesigns genutzt. Die durch die violet- und black Cell aufgestellten Wirkungsgradrekorde blieben für fast ein Jahrzehnt unerreicht. Erst 1984, durch die Entwicklung der MINP-Zelle (metal-insulator-NP junction), konnte mit 18 % ein neuer Wirkungsgradrekord aufgestellt werden. Dieses Zellendesign findet dennoch in der vorliegenden Arbeit keine nähere Betrachtung, da bereits ein Jahr später durch das Konzept der Buried-Contact-Zelle der Rekordwirkungs-grad auf 20 % angehoben wurde. Zusätzlich spielt die MINP-Zelle keine, mit den anderen beschriebenen Zellkonzepten vergleichbare Rolle in der Evolution der siliziumbasierten Solarzellentechnologie. Im Gegensatz dazu setzten sich die mit dem Konzept der Buried-Contact-Zelle eingeführten lokalen Dotierungen in den folgenden Zelldesigns durch, wenngleich in etwas abgewandelter Form.

1988 und 1989 wurden zwei Zellenkonzepte eingeführt, die durch vereinfachte Ableger und Fortschritte in der Produktionstechnologie den Sprung in den kommerziellen Vertrieb geschafft haben. Sie besitzen einen auf den ersten Blick völlig unterschiedlichen Aufbau, erreichen beide aber Wirkungsgrade von über 22 %. Die Rückkontaktzelle erzielte zwar mit 22,3 % einen beeindruckenden Wirkungsgrad, konnte aber nicht zu dem durch die PERL-Zelle über 15 Jahre unerreichten Wirkungsgradrekord von 25 % aufschließen. Die folgende Übersicht soll die Evolution des Wirkungsgrades kristalliner Siliziumzellen bis Ende 2014 nochmals grafisch verdeutlichen.

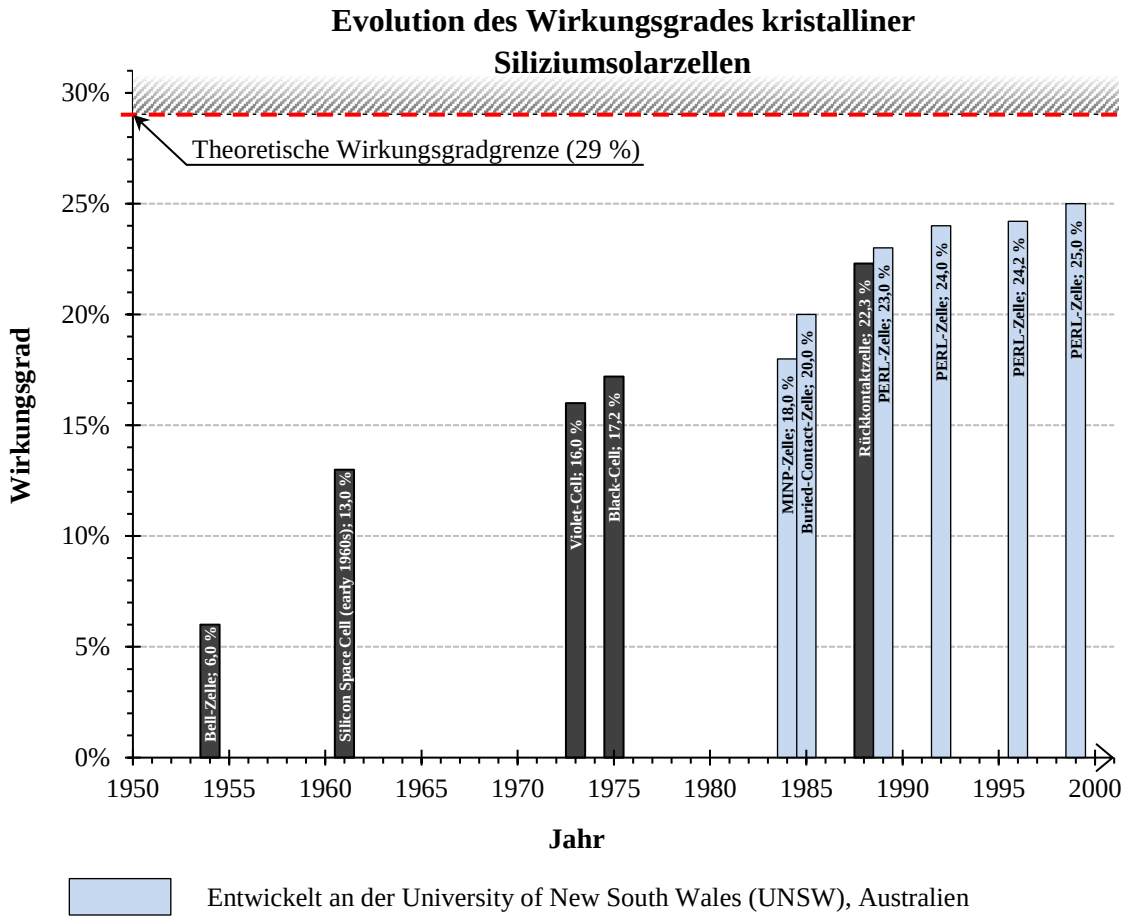


Abbildung 3-14: Evolution des Wirkungsgrades kristalliner Siliziumsolarzellen im Labormaßstab unter Standardtestbedingungen bis Ende 2014. Daten aus: [Green 2003], [Mertens 2011], [Rubin 2010], [Sollmann 2009], [Green *et al.* 2013] und [NREL 2013].

Wie aus der obigen Abbildung zu entnehmen ist, lag der Wirkungsgradweltrekord kristalliner Siliziumsolarzellen im Labormaßstab bereits Ende 2014 nicht weit von der theoretischen Wirkungsgradgrenze (29 %) für die auf kristallinem Silizium basierenden einschichtigen Solarzellentechnologien zur Anwendungen unter dem globalen Standard-solarspektrum entfernt.

Was aber drückt der Wirkungsgrad eigentlich aus und wie ergibt sich die theoretische Wirkungsgradgrenze?

3.3.5.2 Theoretische Begrenzung

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle ist als Verhältnis des Outputs an elektrischer Energie zu dem Input an solarer Strahlungsenergie definiert. Wie bereits im Kapitel Lichtabsorption beschrieben, benötigt ein Valenzelektron eines Halbleiters eine materialspezifische Mindestenergie, um vom Valenzband in das Leitungsband zu

gelangen: die Mindestenergiemenge ΔE_G. Photonen mit einer Energie $E_{Ph} < \Delta E_G$ können demzufolge nicht genügend Energie zur Generation eines Elektronen-Loch-Paars aufbringen und liefern sonach keinen Beitrag zum photovoltaischen Effekt. Ergo sind zur Generation eines Elektronen-Loch-Paars nur Photonen mit einer Energie $E_{Ph} \geq \Delta E_G$ fähig. Für diesen Prozess wird allerdings nur die Energie ΔE_G benötigt, sodass die überschüssige Energiemenge (E_{Ph} - ΔE_G) als Wärme an das Kristallgitter abgegeben wird. Es wird folglich nur ein Elektronen-Loch-Paar je Photon generiert. Durch die Umrechnung der Photonenenergie in die zugehörige Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung ergibt sich eine materialspezifische Grenzwellenlänge λ_G (vgl. Formel 2-24, Kapitel 2.5: Lichtabsorption) des für den photovoltaischen Effekt nutzbaren Spektralbereiches. Dabei versteht sich der nutzbare Teil des solaren Spektrums für Wellenlängen $\lambda \leq \lambda_G$. Die energetischen Verluste, die bei der Absorption elektromagnetischer Strahlung der Wellenlänge $\lambda < \lambda_G$ als Wärme an das Kristallgitter abgegeben werden, fallen unter die Bezeichnung Thermalisierungsverluste.

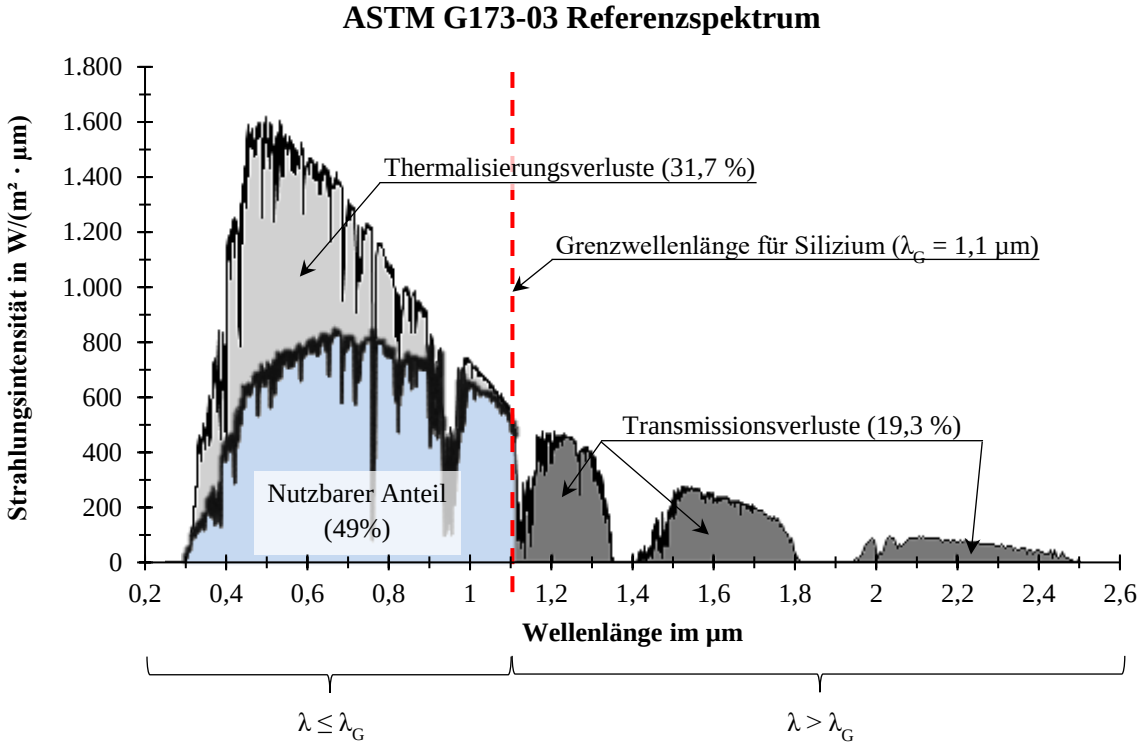


Abbildung 3-15: ASTM G173-03 Referenzspektrum inklusive der Darstellung des durch die Technologie der kristallinen Siliziumsolarzellen nutzbaren Anteils, der Transmissions- und Thermalisierungsverluste sowie der materialspezifischen Grenzwellenlänge.

Bei dem Referenzspektrum aus Abbildung 3-15 handelt es sich um ein mittels des Faktors 1.000/835 aufgewertetes 1,5 AM-Standardspektrum (vgl. Kapitel 2.4.2: Standardtest-bedingungen).

Kristallines Silizium (indirekter Halbleiter) bei 300 K besitzt eine Bandlücke von 1,12 eV und damit eine Grenzwellenlänge von λ_G = 1,1 µm. Bedingt durch die Grenzwellenlänge und die Restriktion, dass für $E_{Ph} \geq \Delta E_G$ die überschüssige Energie in Wärme umgewandelt wird, ergibt sich ein nutzbarer Anteil der gesamt zur Verfügung stehenden Energie in Form elektromagnetischer Strahlung von 49 % (spektraler Wirkungsgrad).

Die folgende Abbildung zeigt nun die sich daraus ergebenden theoretischen Wirkungsgradgrenzen für verschiedene Halbleiter in Abhängigkeit ihrer Bandlücke für einschichtige Solarzellentechnologien unter Standardtestbedingungen.

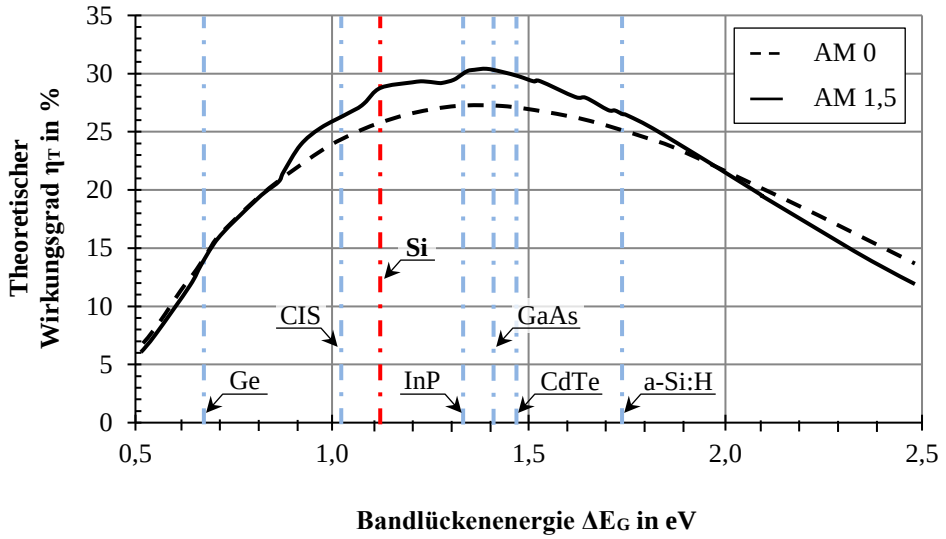


Abbildung 3-16: Theoretische Wirkungsgradgrenzen verschiedener Halbleiter.

Zur Berechnung der in der Abbildung 3-16 dargestellten Funktion wird auf die folgende Literatur verwiesen: [Henry 1980], [Grundmann 2006, S. 513ff] und [Mertens 2011, S. 102ff].

Die vorangegangene Betrachtung gilt allerdings nur für ideale Solarzellen unter Standard-testbedingungen. Da reale Solarzellen bauartbedingt verschiedenen Verlustmechanismen unterliegen, müssen diese zur Erreichung des maximalen Wirkungsrades minimiert werden. Der Rekordwirkungsgrad der PERL-Zelle konnte nur erreicht werden, da die diversen Verlustmechanismen über die Jahre Stück für Stück optimiert wurden. Abbildung 3-17 auf der nachfolgenden Seite zeigt die verschiedenen Kategorien der in realen Solarzellen möglichen Verlustarten.

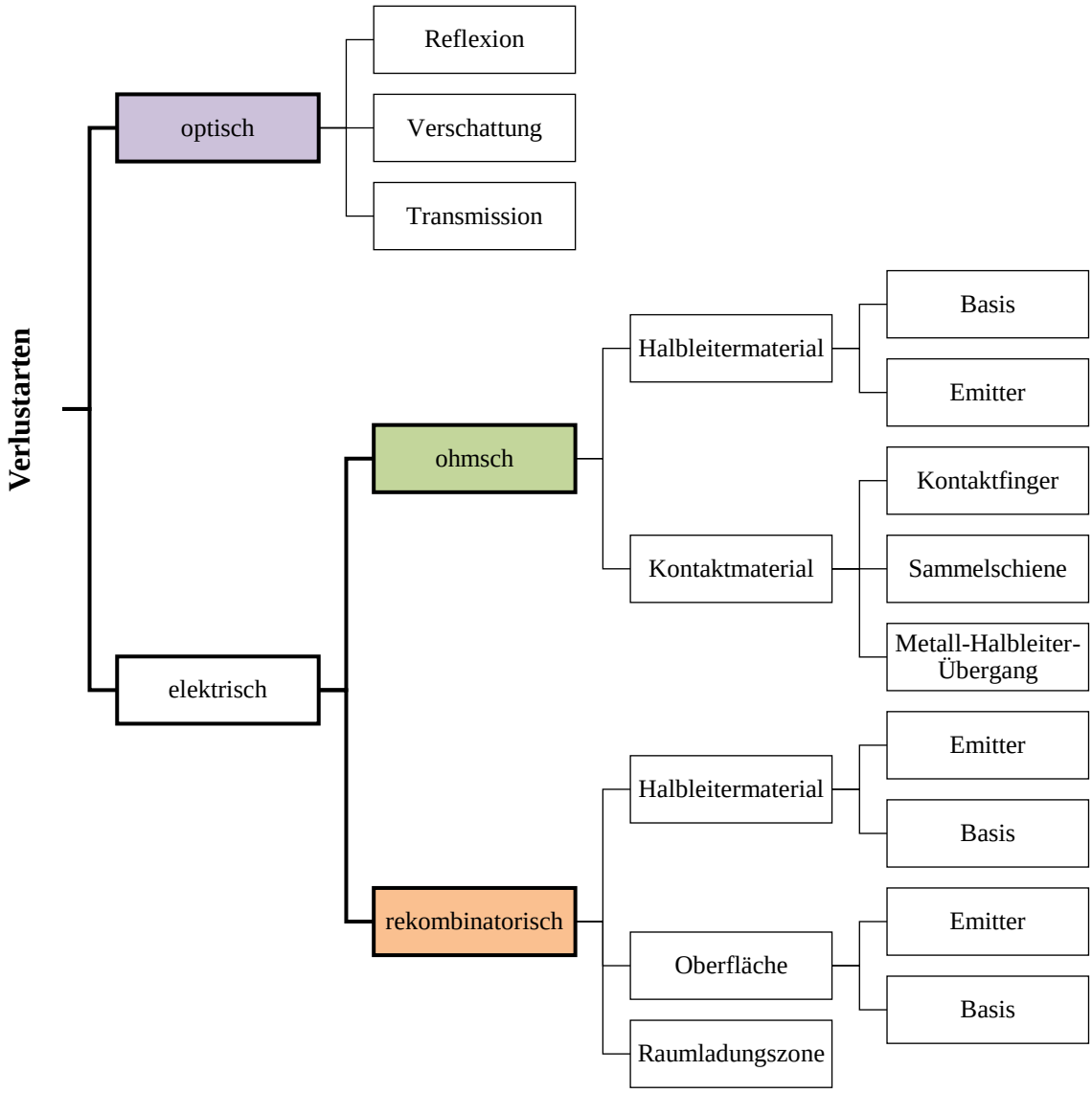


Abbildung 3-17: Übersicht der Mechanismen in der kristallinen Siliziumsolartechnologie, die eine Reduktion des Wirkungsgrades zeitigen.

Zur leichteren Kategorisierung der Verlustarten sind diese in die drei Hauptklassen: optische, ohmsche und rekombinatorische Verluste unterteilt. Zu den Wirkungsgrad-verlusten optischer Natur zählen Minderungen infolge von Reflexion, Verschattung und Transmission. Während der Evolution der siliziumbasierten Solarzelle wurden besonders die optischen Verluste minimiert. Technische Maßnahmen sind eine adäquate Anti-reflexionsbeschichtung, Oberflächentexturierung und Light Trapping. Die Minimierung der Oberflächenverschattung durch die Metallfinger stellt den beschriebenen Spagat zwischen minimal geforderter (ohmsche Verluste) und maximal erwünschter Breite dar. Im Falle der Rückkontaktzelle konnten die Verschattungsverluste sogar gänzlich eliminiert werden. Auch das Konzept der Buried-Contact-Zelle nahm sich diesem Spagat

an und resultierte in einem für diesen Zweck effizienten Design. Mit der Ausführung der Kontaktfinger als schmale und hohe vergrabene Kontakte in der Buried-Contact-Zelle konnten so trotz minimaler Verschattungsverluste die ohmschen Verluste durch den Widerstand im Metallfinger ebenfalls minimiert werden. Ohmsche Verluste treten im Halbleitermaterial, dabei besonders im dünnen Emitter, sowie dem Halbleiter-Metall-Übergang und den Leiterbahnen selbst auf. Den Verlusten am Halbleiter-Metall-Übergang wird mit lokalen hochdotierten Gebieten entgegengewirkt (vgl. Buried-Contact-Zelle und LBSF der PERL-Zelle). Die rekombinatorischen Verluste treten im Halbleitermaterial, dessen Oberfläche und der Raumladungszone auf. Die durch Rekombinationsprozesse „verlorenen“ Ladungsträgerpaare tragen nicht zum photovoltaischen Effekt bei (siehe Fall C_2 und B_2 der Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3) und mindern so den Wirkungsgrad. Eine der wichtigsten technischen Maßnahmen zur Minderung der rekombinatorischen Verluste ist die Passivierung der Oberflächen und der Kontaktbereiche. Die folgende Tabelle 3-7 stellt nochmals alle technischen Errungenschaften bezüglich der Minderung der drei Verlustarten als Übersicht bereit. Dabei sind die technischen Fortschritte dem jeweiligen Zellkonzept zugeordnet, mit dem sie eingeführt wurden. Weiter ist jeder technischen Maßnahme ihr spezieller Effekt zugeschrieben. Zudem sollen die farbig markierten Zeilenenden der Tabelle 3-7 der Zuordnung zu der jeweiligen Verlustkategorie nach Abbildung 3-17 Rechnung tragen.

Tabelle 3-7: Technische Errungenschaften zur Minderung der Verlustarten nach Abbildung 3-17, unter Zuordnung zum Zellenkonzept mit dem sie eingeführt wurden.

Einführung durch (Jahr / Wirkungsgrad)	**Technische Neuerung**	**Effekt / Wirkung / Zuordnung**
Bell-Zelle (1954 / 6%)	Grundlegender Aufbau (pn-Übergang kombiniert mit inneren Photoeffekt)	Nutzung des photovoltaischen Effektes zur direkten Konvertierung von elektromagnetischer Strahlung in elektrische Energie
Silicon Space Cell (1961 / 13%)	Antireflexionsschicht	Reduzierung des reflektierten Anteils der Strahlung ⇨ Erhöhung Wirkungsgrad
Violet-Cell (1973 / 16%)	Vollflächiger Aluminiumrückkontakt	Minderung Transmissionsverluste ⇨ künstlich verlängerter Strahlungsdurchgang ⇨ Dünnere Zelle bei höherem Wirkungsgrad möglich
	p^+-dotierte Schicht an Zellenrückseite	Back-Surface-Field (BSF) ⇨ Minderung Oberflächenrekombination auf Zellenrückseite ⇨ Erhöhung Wirkungsgrad
	Fotolithografie	Dünnere Metallfinger ⇨ Minderung Verschattungsverluste ⇨ Erhöhung Wirkungsgrad
	Bessere Produktionsverfahren führen zu dünneren n^+-Emitter	Erhöhung der Wahrscheinlichkeit eines Beitrags zum PV-Effekt für generierte Ladungsträgerpaare ⇨ Weniger Materialverbrauch
	n^{++}-Dotierung am Halbleiter-Metallfrontkontakt-Übergang	Front-Surface-Field (FSF) ⇨ Minderung der Oberflächenrekombination an Frontkontakten ⇨ Erhöhung Wirkungsgrad

Weiter **Tabelle 3-7**

Einführung durch (Jahr / Wirkungsgrad)	**Technische Neuerung**	**Effekt / Wirkung / Zuordnung**
	Nutzung einer Doppelantireflexions-schicht durch Beschichtung mit SiO_2 und TiO_2	Oberflächenpassivierung ⇨ Minderung Oberflächenrekombination
		Verbesserte Antireflexionsschicht ⇨ Verbesserung der Reflexionseigenschaften ⇨ Erhöhung Wirkungsgrad
Black-Cell (1975 / 17,2%)	Oberflächentexturierung	Pyramidenstruktur der Oberfläche ⇨ geringerer Reflexionsfaktor
		Schräger Strahlungsdurchgang ⇨ Äquivalent zu Faktor 1,35 höheren Absorptionskoeffizienten, bzw. einer um den gleichen Faktor dickeren Halbleiterschicht
	Light Trapping	Reduzierung Reflexionsfaktor
		Erschwerter Strahlungsaustritt ⇨ Minderung der Verluste durch Transmission
		Wegverlängerung um max. $4n^2$ ⇨ dadurch bessere Absorptionsfähigkeit für Licht mit λ = 750 bis 1.000 nm ⇨ Dünnere p-Basis möglich, ohne Einbußen bei Qualität der Lichtabsorption

Weiter **Tabelle 3-7**

Einführung durch (Jahr / Wirkungsgrad)	**Technische Neuerung**	**Effekt / Wirkung / Zuordnung**
Buried-Contact-Zelle (1985 / 20%)	„eingegrabene“ Frontkontakte	Reduzierung ohmscher Widerstand
		Reduzierung Verschattungsverluste
		⇨ Minimale Verschattungsverluste bei geringem ohmschen Widerstand möglich
	Veränderte Fertigungstechnik und Zusammensetzung der Metallfinger	Verringerter ohmscher Widerstand
	Texturierte Zellenunterseite	Verbessertes Light Trapping ⇨ Künstliche Verlängerung des Strahlungsdurchganges ⇨ Erhöhter Wirkungsgrad
Rückkontaktzelle (1988 / 22,3%)	Kontaktierung nur auf eine Zellenseite beschränkt	Keine Verschattungsverluste
		Kontaktfinger beliebig ausführbar ⇨ Minimierung ohmscher Widerstand in Kontaktfingern
PERL-Zelle (1989 / 23%)	Optimierte Oberflächentexturierung	Invertierte Pyramidenstruktur ⇨ Optimiertes Light Trapping
	Kleine Kontaktbereiche der Halbleiter-Metallfrontkontakte	Minimierung Rekombinationsverluste
	Begrenzte Zellenrückseiten-kontaktierung mit lokal stark p-dotierten Bereichen	Local Back Surface Field (LBSF) ⇨ Minimierung der Halbleiter-Metallkontakt-Rekombinationseffekte

Modernste Zellkonzepte, wie der Wirkungsgradspitzenreiter (PERL-Zelle), beinhalten nahezu alle verlustminimierenden Fortschritte zur Erreichung ihres hohen Wirkungsgrades. Dies soll auch die folgende direkte Gegenüberstellung der Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1960er (Wirkungsgrad: 13 %, 1961) und der PERL-Zelle (Wirkungsgrad 25 %, 1999-2014) nochmals veranschaulichen und die Evolution der auf kristallinem Silizium basierenden einschichtigen Solarzellentechnologien für Anwendungen unter dem globalen Standardsolarspektrum verdeutlichen.

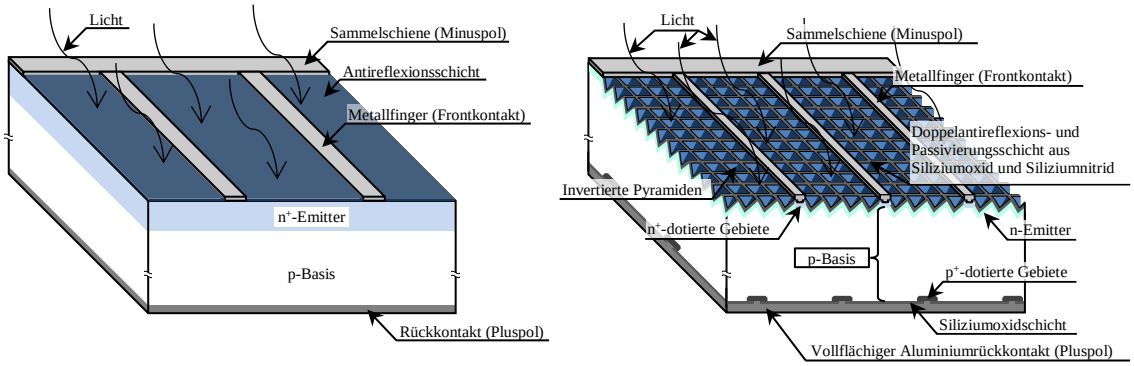


Abbildung 3-18: Gegenüberstellung der Detailausschnitte des Aufbaus der Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1960er und der PERL-Zelle.

Derweilen können aktuelle PERL-Zellen rund fünf Prozent der zur Verfügung stehenden Strahlung durch Verschattung und Reflexion nicht nutzen. Gleichwohl sinkt ihre Performance um weitere ein bis zwei Prozent durch nicht optimales Light Trapping, sowie durch eine nicht 100%ige optische Reflexion am Zellenboden. [Green 2003, S. 263]

Es bleibt folglich noch ein wenig Raum für Verbesserungen, um dem theoretischen Wirkungsgradmaximum so nahe wie möglich zu kommen. Meist bleiben solche hocheffizienten Zellentechnologien durch ihren enormen Produktionsaufwand jedoch allenfalls Spezialanwendungen vorbehalten. Wie aufgezeigt, liegen ihre kommerziellen Ableger jedoch aufgrund der Weiterentwicklungen und Forschungen in den Bereichen der Produktionstechnologien und der verwendeten Materialien indessen mittlerweile nicht mehr weit von ihren, aus den Laboren stammenden, Pendants entfernt.

Weitere Effizienzsteigerungen sind durch die Wahl eines anderen Halbleitermaterials, sowie durch Konzentratorsysteme möglich. Auch die gezielte Veränderung des Lichtspektrums ist inzwischen ins Blickfeld der Forschung geraten.

3.4 Dünnschichtzellentechnologie

3.4.1 HIT-Zelle

Wie bereits erwähnt, gilt die Technologie der HIT-Zelle (Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer) als Sonderform der kristallinen Siliziumsolarzellentechnologie. Sie stellt praktisch das Spagat, beziehungsweise den Übergang zwischen der kristallinen Siliziumsolarzellen- und der Dünnschichttechnologie dar, indem sie Aspekte und Halbleitermaterialien beider in sich vereint. Die folgende Abbildung zeigt den grundlegenden Aufbau einer HIT-Zelle.

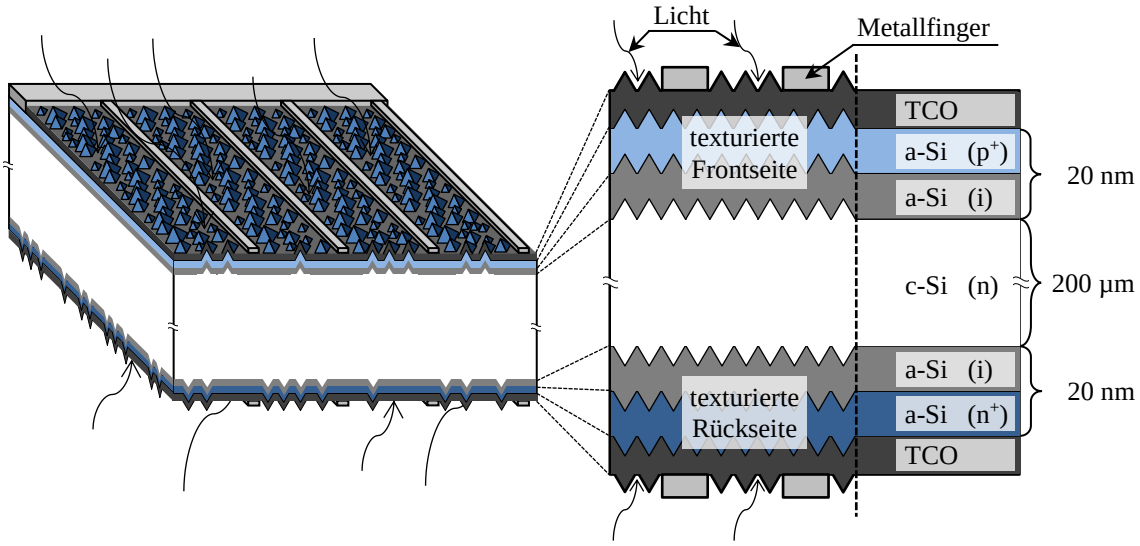


Abbildung 3-19: Gegenüberstellung des dreidimensionalen und des zweidimensionalen Detailausschnittes des Aufbaus einer HIT-Zelle.

Wie in Abbildung 3-19 kontrastiert, wird für nachstehende Dünnschichtzellen-technologien zugunsten der Übersichtlichkeit und einem gleichwohl leichteren Verständnis des Aufbaus auf die gewohnte dreidimensionale Darstellungsweise verzichtet und diese durch eine detaillierte zweidimensionale Abbildungsform ersetzt.

Der grundlegende Aufbau einer HIT-Zelle setzt sich aus einem texturierten, dünnen (circa 200 µm) n-dotierten kristallinen Siliziumwafer und jeweils einer beinahe identischen Front- und Rückseite zusammen. Unter den mittels des Siebdruckverfahrens aufgebrachten Metallfingern befindet sich eine transparente Elektrode aus leitendem Oxid – das sogenannte TCO. TCO steht für „Transparent Conducting Oxide“ und setzt sich in der Regel aus einem Indium-Zinn-Oxid (ITO) oder einem Zink-Oxid (ZnO) zusammen. Obwohl die transparente Elektrode aus einem leitenden Oxid besteht, sind

durch dessen hochohmigen Widerstand [Mertens 2011, S.133] die zusätzlichen Metallfinger notwendig. Unter der transparenten Elektrode befinden sich beidseitig stark dotierte amorphe Siliziumschichten. Dabei ist die Art der Dotierung für Vorder- und Rückseite unterschiedlich. An die transparente Elektrode der Frontseite schließt sich eine p^+-dotierte amorphe Siliziumschichte an, währenddessen an das rückseitige TCO eine n^+-dotierte amorphe Siliziumschicht angefügt ist. Zwischen den stark dotierten amorphen Siliziumlagen und dem n-dotierten kristallinen Siliziumwafer befindet sich auf beiden Seiten eine zusätzliche undotierte (intrinsische) amorphe Siliziumschicht. Die beiden amorphen Schichten auf der Front- und Rückseite der Zelle besitzen jeweils eine Gesamtdicke von rund 20 nm und bewirken dabei eine hervorragende Passivierung. Die Schichtfolge auf der Frontseite a-Si (p^+) / a-Si (i) / c-Si (n) fungiert zudem als ein sperrender p-n Heterokontakt [Kaltschmitt *et al.* 2005, S. 218].

Wenngleich die transparente Elektrode und die darunterliegende dotierte amorphe Siliziumlage rund 10 % der verfügbaren Strahlung absorbieren, führt das HIT-Zellendesign derzeit zur besten Absorption und Isolation photogenerierter Ladungsträger im Vergleich zu irgendeinem anderen einsonnen, auf kristallinen Silizium basierenden Solarzellenkonzept. Ein potenzieller Grund stellt der duale Heteroübergang dar, der die im kristallinen Silizium generierten Ladungsträger von den Gebieten hoher Oberflächenrekombination an den ohmschen Kontakten fernhält. Weiter ist die beidseitige Texturierung der einseitigen überlegen, besonders wenn in die Modulrückseite ein optischer Reflektor eingebaut wird.

Entgegen der Verwendung einer p-dotierten Basis, wie bei der kristallinen Siliziumzellentechnologie typisch, besitzt die HIT-Zelle eine n-dotierte, einkristalline Siliziumscheibe als photovoltaisches Absorbermaterial. [Kaltschmitt *et al.* 2005, S. 218] Ein Vorteil dieser oppositiven Handhabe ist, dass n-dotierte Substrate frei von lichtinduzierten Degradationseffekten[4] sind. Weiter besitzt n-dotiertes Silizium eine höhere Toleranz[5] gegenüber Eisen, was eine häufige Substratverunreinigung darstellt [Green 2012, S. 121].

[4] Die p-Dotierung kristallinen Siliziums erfolgt in der Photovoltaiktechnologie fast ausschließlich durch das kontrollierte Verunreinigen mit Bor. Nachteil ist die Bildung von Bor-Sauerstoff-Komplexen mit dem während der Waferherstellung (Prozessschritt: Siliziumschmelze) in die Schmelze eingetragenen Sauerstoffs. Diese Bor-Sauerstoffkomplexe mindern erst unter Beleuchtung die Effizienz von Zellenkonzepten mit einer p-dotierten Basis – in Form zusätzlicher Rekombinationszentren.

[5] Im Gegensatz zum p-dotierten Silizium wird für die Herstellung n-dotierten Siliziums kein Bor verwendet (vgl. Kapitel 2.1.2.2: Störstellenleitung, S. 35ff). Das im p-dotierten Silizium befindliche Bor bildet mit weiteren Verunreinigungen, wie beispielsweise Eisen, Komplexe, die ebenfalls zusätzliche Rekombinationszentren darstellen.

Wird auf einen optischen Reflektor am Zellenboden verzichtet, kann beim konkreten Einsatz der HIT-Zelle als bifaciale Zelle laut [Mishima *et al.* 2011] ein um 10,9 % erhöhter Ausgangsstrom generiert werden.

Das ursprünglich von der japanischen Firma Sanyo entwickelte Zellenkonzept der HIT-Zelle konnte vor 2010 als Laborzelle einen Wirkungsgrad von 23 % aufweisen. Da 2010 wichtige Patente zu diesem Zellendesign ausliefen, übernahmen andere Firmen diesen Ansatz. Panasonic konnte durch weitere Forschung 2013 eine Laborzelle im HIT-Design mit einem Wirkungsgrad von 24,7 % herstellen [NREL 2013]. Derweilen produzierte Sanyo schon 2010 HIT-Zellen mit einer kumulierten Gesamtleistung von rund 300 MW_p. Allerdings besitzen diese kommerziellen Ableger maximal einen Wirkungsgrad von 19 %, wobei die Ursache für diese Differenz zurzeit nicht beschrieben oder bekannt ist.

3.4.2 Zellen aus amorphem Silizium

Wenngleich bei der Technologie der HIT-Zelle kristallines und amorphes Silizium kombiniert wird, gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Zellenkonzepte, die nur aus amorphem Silizium und gezielt verunreinigtem amorphem Silizium bestehen. Amorphes Silizium kam Mitte der 1970er als Material für die Photovoltaik auf, als Dave Carlson und Chris Wronski in den RCA Laboren, Princeton, New Jersey[6] die erste auf amorphem Silizium basierende Solarzelle herstellten. 1976 wurde die Konzeption dieser Zelle erstmals publiziert, wobei der anfängliche Wirkungsgrad von 2,4 % noch im selben Jahr auf 5,5 % gesteigert werden konnte. [Carlson *et al.* 1976] Der Erfolg des amorphen Siliziums basiert auf seinem hohen Absorptionskoeffizienten für den sichtbaren Spektralbereich, seinen guten elektrischen Eigenschaften und der Möglichkeit, die Leitfähigkeit durch Dotierung gezielt zu beeinflussen.

Was aber unterscheidet amorphes Silizium von kristallinem Silizium? Wie wirkt sich der Unterschied auf die Technologie der Solarzellen aus?

[6] Die Einrichtung wurde 1951 zu Ehren des Gründers in David Sarnoff Labore umbenannt.

3.4.2.1 Eigenschaften amorphes Silizium

Kristallines Silizium besitzt eine vollkommen regelmäßige und periodische Struktur. In solch einer kristallinen Siliziummatrix ist jedes Siliziumatom kovalent an vier Nachbarsiliziumatome gebunden. Alle Bindungen besitzen im gesamten Gefüge die gleiche Länge (circa 0,235 nm) und den gleichen Winkel (109° 28‘). Es kann eine Einheitszelle definiert werden, welche durch Vervielfachung und Stapelung das Kristallgitter beschreibt – es handelt sich um eine Struktur mit Fernordnung. [Zeman 2006, S. 177]

Dementgegen besitzt amorphes Silizium kaum eine Fernordnung. Sowohl die Bindungslängen als auch die Bindungswinkel variieren in zufälliger Weise. Die Standardabweichungen der Bindungswinkel betragen typischerweise rund 6 bis 9° vom Bezugswinkel 109° 28‘ [Shah 2012, S. 216]. Ist die Verteilung der Werte der Bindungslängen und –winkel gering, wird von wenig „Unordnung“ im Gitter gesprochen. Solch eine amorphe Siliziumschicht besitzt eine für den Einsatz in der Photovoltaik gute Qualität mit befriedigenden elektrischen Eigenschaften. Ist die Verteilung der Werte indes höher (es herrscht eine große „Unordnung“), hat das unbefriedigende elektrische Eigenschaften zur Folge, da die Fehlordnung die Bandkantenzustände direkt beeinflusst. Die dennoch geringen Abweichungen der Bindungslängen und –winkel in amorphem Silizium führen letztendlich aber zu einem völligen Verlust der lokal geordneten Struktur auf atomarer Ebene[7] – Resultat ist ein kontinuierlich zufälliges Netzwerk. [Zeman 2006, S. 177]

Trotz dieser Unterschiede in der Fernordnung besitzt amorphes Silizium jedoch einen gewissen Grad an Nahordnung. Es herrscht Ähnlichkeit in der Konfiguration auf atomarer Ebene mit kristallinem Silizium.

Wie Abbildung 3-20 zu entnehmen ist, besitzen die meisten Siliziumatome einer amorphen Siliziumschicht kovalente Bindungen zu vier Nachbaratomen; circa 1 von 10^4 Siliziumatomen kann dabei keine kovalenten Bindungen zu genau vier Nachbaratomen aufweisen. Durch die Variation der Bindungslängen und –winkel zwischen den Siliziumatomen in der amorphen Struktur kommt es unregelmäßig zu schwächeren Bindungen, welche durch die Zufuhr von Energie (beispielsweise Wärme) einfacher

[7] Daher auch die Namensgebung: amorph – griechisch: ohne Struktur

aufgebrochen werden können. Dies führt zu Defekten in der Kristallstruktur.[8] In amorphem Silizium ist die Hauptursache von Defekten die kovalente Bindung an nur drei Nachbaratome. Somit besitzt das „Defektatom“ nur 3 kovalente Bindungen und ein ungebundenes Elektron – eine sogenannte dangling bond (baumelnde Bindung). In reinem amorphem Silizium beträgt die Defektdichte circa 10^{21} Defekte je cm^3. [Zeman 2006, S. 178]

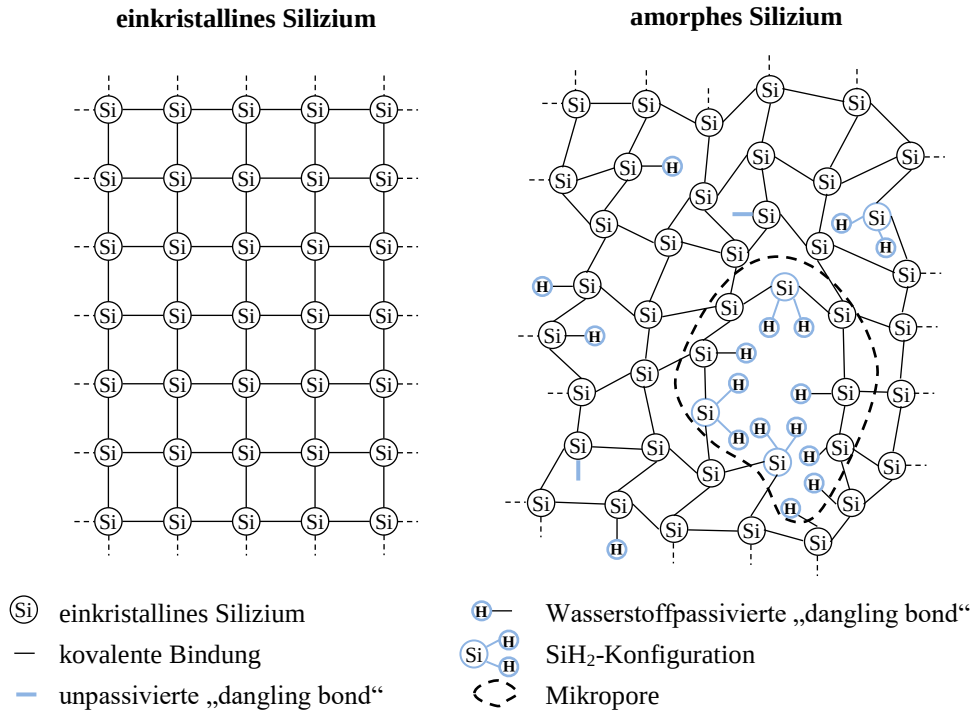


Abbildung 3-20: Zweidimensionale Darstellung der Atomstruktur von einkristallinem Silizium und hydriertem amorphem Silizium mit Kennzeichnung einer Mikropore und SiH_2-Konfigurationen.

Um das Material für optoelektrische Anwendungen verwendbar zu machen, wird zur Passivierung der dangling bonds Wasserstoff während der Deposition zugegeben. Der Wasserstoff sättigt einen Großteil der offenen Bindungen ab und mindert so die Anzahl potenzieller Rekombinationszentren. [Repmann 2003, S. 7ff] Das hydrierte amorphe Silizium (a-Si:H) besitzt eine Dichte an verbleibenden ungesättigten dangling bonds zwischen 10^{14} und 10^{17} je cm^3.[9] Die Differenz der Dichte der dangling bonds resultiert aus deren Zuordnung zu zwei unterschiedlichen Stadien der Materialverwendung. Für die Photovoltaik frisch produziertes oder regeneriertes (der Vorgang der Regeneration wird

[8] Im Gegensatz zur Definition eines Defektes in einem Kristall (jedes Atom, dass sich in einem Kristallgitter nicht an vorgeschriebener Stelle befindet) unterscheiden sich Defekte für ein kontinuierlich zufälliges Netzwerk. Dort besitzen Atome keine fest vorgeschriebenen Stellen, weshalb Defekte sich in Abweichungen der geforderten vier kovalenten Bindungen zu den Nachbaratomen äußern.

[9] a-Si:H mit einer Dichte von 10^{15} dangling bonds je cm^3 besitzt weniger als ein Defekt je zehn Millionen Siliziumatomen.

im Folgenden näher betrachtet) a-Si:H enthält je nach Modifikation rund 10-15 % [Shah 2012, S. 210], in manchen Fällen sogar bis 20 % Wasserstoff [Repmann 2003, S. 8], sowie eine Defektdichte von 10^{14} dangling bonds je cm³. Wird das Material Licht ausgesetzt, tritt ein Degradationseffekt ein, der mit einer steigenden Anzahl unpassivierter dangling bonds einhergeht – der Staebler-Wronski-Effekt (SWE)[10].

Wenngleich der bereits 1977 beschrieben Effekt der lichtinduzierten Degradation [Staebler und Wronski 1977] von a-Si:H bis heute nicht vollends geklärt ist, wurde er experimentell bestätigt. Die vorherrschende Meinung besagt, dass die mittels Wasserstoff passivierten dangling bonds durch Lichteinwirkung wieder aufgebrochen werden können und so zusätzliche Rekombinationszentren darstellen[11]. Begünstigt wird dieser Effekt mit steigender Anzahl von Siliziumatomen, die mittels zwei Wasserstoffatomen passiviert sind. In solchen SiH_2-Konfigurationen sind die Silizium-Wasserstoff-Bindungen einfacher aufzubrechen. Dieses Verhalten wurde in Materialien mit vielen Mikroporen (vgl. Abbildung 3-20) beobachtet. [Shah 2012, S. 217] Nach einer materialabhängigen Bestrahlungsdauer stabilisiert sich der Effekt auf einem höheren Defektdichteniveau (10^{17} Defekte je cm³), was sich in einer symptomatischen Wirkungsgradreduzierung von 15 bis 30 % [Zeman 2006, S. 176] äußern kann.[12]

Somit stellt die Mikrostruktur von amorphem Silizium eine wichtige strukturale Eigenschaft dar, die zwar kaum einen Einfluss auf die Ausgangseigenschaften amorpher Siliziumschichten hat, aber stark die Verwendbarkeit dieser durch Auswirkungen auf den Staebler-Wronski-Effekt beeinflusst. Experimentell bestätigt können laut [Shah 2012, S. 217f], [Goetzberger und Hoffmann 2010, S. 60] und [Repmann 2003, S. 9] folgende Beobachtungen zum Staebler-Wronski-Effekt festgehalten werden:

- Die Verwendung einer Wasserstoffverdünnung während der Deposition und die Erhöhung der Verfahrenstemperatur kann die Auswirkung (Stärke der Leistungsminderung) senken.
- Amorphe Siliziumschichten mit vielen Mikroporen und / oder mit einer hohen Konzentration an chemischen Verunreinigungen (Sauerstoff, Stickstoff, …) zeigen einen stärkeren SWE.

[10] Benannt nach den Entdeckern: D.L. Staebler und C.R. Wronski.

[11] Andere Ansätze gehen vom Aufbrechen verspannter Si-Si-Bindungen durch die Rekombination mittels Licht erzeugter Ladungsträgerpaare aus. Siehe hierzu [Mertens 2011, S. 124].

[12] In Extremfällen (Light Soaking) wird von einer Leistungsreduzierung von bis zu 37% berichtet [Mertens 2011, S. 124].

- Die Temperatur der amorphen Siliziumschicht und die Beleuchtungsintensität beeinflussen das Degradationsverhalten.
- Bei amorphen Siliziumschichten, die mittels des PECVD-Verfahrens hergestellt werden, zeigt sich mit hohen Depositionsraten ein erhöhter SWE. Hier wirkt der SWE als Limitation der Depositionsrate zu 0,1 nm/s. Gleichwohl kann mit anderen Depositionstechniken (bspw. VHF – very high frequency plasma deposition) eine gesteigerte Rate von bis zu 1 nm/s bei marginal erhöhtem SWE erreicht werden. Diese verfahrenstechnische Optimierung spielt bei der ökonomischen Betrachtung der Herstellungsprozesse eine wichtige Rolle, da Produzenten mit einer möglichst hohen Depositionsrate arbeiten.
- Die Stärke des Effektes steigt mit zunehmender Schichtdicke.

Weiter handelt es sich um einen reversiblen Effekt. Bei Erwärmung des amorphen Siliziums auf circa 160 °C kann der Degradationseffekt rückgängig (bis auf das Ausgangsniveau)[13] gemacht werden. So zeigen Solarzellen aus amorphem Silizium eine saisonale Wirkungsgradabhängigkeit, welche zu einer Wirkungsgraderhöhung durch die Zellenerwärmung im Sommer führt (bei Ausklammerung aller weiteren saisonalen Einflüsse).

In den letzten 30 Jahren wurde ein enormer Forschungsaufwand betrieben, um den Staebler-Wronski-Effekt zu verstehen und Zellenkonzepte basierend auf amorphem Silizium entsprechend anzupassen. Einen guten Überblick und weiterführende Informationen bieten [Shimizu 2004], [Abtew und Drabold 2006] sowie [Wronski 1997].

Bei amorphem Silizium handelt es sich um einen direkten Halbleiter. Im Impulsraum liegen das energetische Maximum des Valenzbandes und das energetische Minimum des Leitungsbandes übereinander (vgl. Kap.: Lichtabsorption). Der Absorptionskoeffizient liegt für Licht einer Wellenlänge von 600 nm um den Faktor 10 höher als bei kristallinem Silizium. Allerdings variiert die Bandlücke von wasserstoffpassivierten amorphem Silizium zwischen 1,7 und 1,8 eV als Funktion der Wasserstoffkonzentration. Die Verwendung von hydriertem amorphem Silizium hat den Vorteil, dass die Bandlücke durch den Versatz mit Additiven gezielt zwischen 1 und 2,1 eV modifiziert werden kann.

[13] Es handelt sich um eine thermische Regenerierbarkeit des Materials bezüglich des SWE.

Tabelle 3-8: Versatzmaterialien für hydriertes amorphes Silizium.

		Symbol	Wirkung	Kennzeichnung
Versatzmaterial	**Germanium**	Ge	Verkleinerung der Bandlücke	a-SiGe:H
	Kohlenstoff	C	Vergrößerung der Bandlücke	a-SiC:H
	Sauerstoff	O_2	Vergrößerung der Bandlücke	a-SiO:H
	Stickstoff	N_2	Vergrößerung der Bandlücke	a-SiN:H

Beispielsweise kann durch die Änderung des Silan- und Monogermanverhältnisses des Gasgemisches im Depositionsprozess die Bandlücke für a-$Si_{1-x}Ge_x$:H in den Grenzen zwischen 1,7 eV (für x = 0) und 1,0 eV (für x = 1) eingestellt werden [Zeman 2006, S. 196f].

Weiter kann hydriertes amorphes Silizium ähnlich wie kristallines Silizium dotiert werden. Für eine p-Dotierung werden gezielt Boratome, für eine n-Dotierung gezielt Phosphoratome eingebaut.

3.4.2.2 pin-Struktur

Die ambipolare Diffusionslänge von undotierten, hydrierten amorphem Silizium (intrinsisches a-Si:H) ist mit 0,1 bis 0,3 µm um den Faktor 100 geringer als bei kristallinem Silizium (vgl. Tabelle 3-4, Kap. 3.1: Der photovoltaische Effekt). Gleichwohl sinkt die ambipolare Diffusionslänge durch steigende Defektdichten in dotierten a-Si:H-Schichten. Bedingt durch die sehr kleinen Diffusionslängen in diesen Schichten würden bei der Verwendung eines pn-Übergangs nahezu alle photogenerierten Ladungsträger rekombinieren und nicht zum photovoltaischen Effekt beitragen. Deshalb unterscheidet sich der grundlegende Aufbau einer a-Si:H-Zelle von einer kristallinen Siliziumzelle nicht nur durch die Verwendung eines direkten Halbleiters, sondern hauptsächlich durch eine prinzipiell andere Struktur. Anstelle der Nutzung eines pn-Übergangs, wie bei den meisten anderen Zellenkonzepten, wird sich einer pin-Struktur bedient.

Wie der Abbildung 3-21 zu entnehmen ist, setzt sich die zur Nutzung des photovoltaischen Effektes benötigte Halbleiterstruktur einer Standardeinschicht-a-Si:H-Zelle aus einer p-dotierten a-SiC:H Schicht, einer intrinsischen a-Si:H-Schicht und einer n-dotierten a-Si:H-Schicht zusammen, wobei die intrinsische Schicht die eigentlich photoaktive Schicht darstellt. Die dotierten Schichten sind mit 10 nm im Falle der

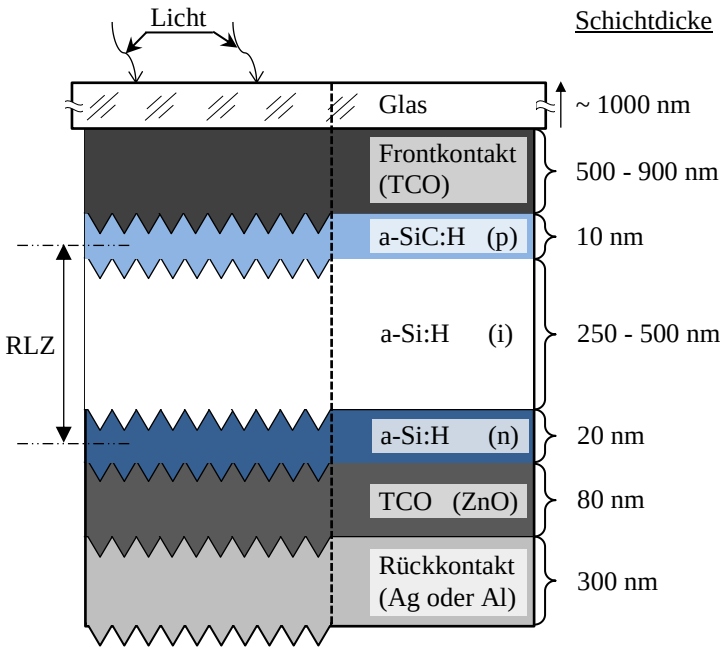


Abbildung 3-21: Zweidimensionaler Detailausschnitt des Aufbaus einer Standardeinschicht-a-Si:H-Zelle als pin-Struktur in Superstratekonfiguration.

p-dotierten Schicht und 20 nm im Falle der n-dotierten Schicht verglichen zu der intrinsichen Schicht (250 – 500 nm) sehr dünn. Grund dafür ist die, bedingt durch die kurzen Diffusionslängen, hohe Wahrscheinlichkeit der Rekombination von in diesen Schichten photogenerierten Ladungsträgern und der so für den photovoltaischen Effekt verloren gegangene Teil der dafür absorbierten Strahlungsenergie. Da die p-dotierte amorphe Schicht bei der pin-Struktur die der Strahlungsquelle zugewandte Seite darstellt, wird deren Bandlücke zur Verringerung der eben beschriebenen Absorptionsverluste vergrößert. Solche p-dotierten a-SiC:H oder a-SiO:H-Schichten werden deshalb auch als Fensterschicht (engl.: window layer) bezeichnet. Dabei gilt ein Kohlenstoffgehalt von circa 40 % (entspricht einer Bandlücke von rund 2,1 eV) als grenzwertig, da sich mit weiter steigendem Kohlenstoffgehalt die elektrische Leitfähigkeit der Schicht auf einen Wert ($< 10^{-6}$ S/cm) verschlechtert, der für den Gebrauch in der Solartechnik nicht geeignet ist [Shah 2012, S. 219]. Der p- und n-dotierten Schicht der pin-Struktur liegt als Hauptfunktion die Ausbildung eines elektrischen Feldes ob. Somit ist ein weiterer Vorteil der a-Si-Zellentechnologie, dass sich das elektrische Feld, bedingt durch die Schichtfolge, über die gesamte photoaktive intrinsische Lage erstreckt.

Die intrinsische a-Si:H-Lage besitzt, je nach Wasserstoffgehalt, eine Bandlücke von 1,7 bis 1,8 eV und fungiert als Absorptionsschicht. Die in dieser Schicht photogenerierten Ladungsträgerpaare werden durch das vorherrschende elektrische Feld getrennt. Die Güte

der Ladungsträgertrennung und damit die Effizienz der Solarzelle wird neben der Materialqualität der intrinsischen Schicht (Reinheit) und der dadurch bedingten Ladungsträgerlebensdauer auch durch das Profil und die Stärke des elektrischen Feldes bestimmt. Das Profil des elektrischen Feldes über die Absorptionsschicht hängt stark von der Verteilung möglicher Defekte und der resultierenden Defektdichte in der intrinsischen a-Si:H-Schicht ab. Die Stärke des elektrischen Feldes hingegen ist eine Funktion der Dotierstärke der p- und n-Schicht sowie der Dicke der intrinsischen Schicht selbst. Somit ergibt sich ein Optimierungsproblem bezüglich der intrinsischen a-Si:H Schichtdicke. Zum einen nimmt die Absorptionsfähigkeit mit steigender Schichtdicke zu, zum anderen nimmt die Güte der Ladungsträgertrennung mit steigender Schichtdicke ab. Ohne weitere technische Maßnahmen wie Light Trapping reicht allerdings eine Schichtdicke der photoaktiven Schicht (intrinsische a-Si:H-Schicht) von 500 nm zur Absorption des Großteils der einfallenden Strahlung als obere Restriktion aus, da die Eindringtiefe bei einer Wellenlänge von 600 nm nur 250 nm beträgt [Mertens 2011, S. 122].

Die dotierten Schichten der Zelle sind jeweils mit einer durchsichtigen, leitenden Oxidschicht bedeckt (TCO). Die beiden TCO-Lagen der Front- und Rückseite haben neben der eigentlichen Funktion des Ladungsträgerabtransportes jedoch unterschiedliche Bedingungen zu erfüllen. Um Verschattungsverluste auf der Lichtzugewandten Seite zu vermeiden, erfolgt die Kontaktierung nur mittels der TCO-Lage (es gibt keine Metallfinger), weshalb diese entsprechend dick ausgeführt werden muss. Die Rückseiten-kontaktierung besteht neben der, im Vergleich zur Frontseite wesentlich dünneren, TCO-Lage noch zusätzlich aus einer vollflächigen Rückkontaktierung aus Silber oder Aluminium. Die Kombination der Rückseitenkontaktierung aus TCO und vollflächigen Metallkontakt verfolgt dabei drei Ziele. Zum einen dient der Metallkontakt wie schon bei der kristallinen Siliziumtechnologie als optischer Reflektor am Zellenboden, der durch die Kombination mit TCO in der Wirkung verstärkt wird. Zum zweiten kann der Kontakt durch einen geringohmschen Widerstand erfolgen, wodurch die Schichtdicke des TCO verringert werden kann. Drittens dient die sich zwischen Metallkontakt und n-dotierter a-Si:H-Schicht befindliche TCO-Lage als Schutz vor direkter Querdiffusion zwischen amorphem Silizium und dem verwendeten Metallkontakt.

Weiter wird die Zelle texturiert, um die positiven Effekte durch Light Trapping auch für diese Technologie zu nutzen. Neben der erhöhten Absorptionswahrscheinlichkeit hat dies eben auch eine Verringerung der Schichtdicken zur Folge. Somit werden Dicken der

intrinsischen Schicht von circa 250 nm bei mindestens gleich hoher Absorptionsrate möglich. Dies führt zu einem stärkeren elektrischen Feld über diese Lage und einer gleichzeitigen möglichen Verringerung der p- und n-Schichtdicken.

Bei der Bezeichnung der Solarzellen aus a-Si:H wird zudem nach der Depositionsreihenfolge differenziert. Beginnend mit der Abscheidung der amorphen Siliziumschichten auf das Trägermaterial wird so zwischen pin- und nip-Zellen, beziehungsweise zwischen „superstrate“ und „substrate“ unterschieden. Die Unterteilung nach pin- und nip-Struktur deutet direkt auf die Reihenfolge der Halbleiterabscheidung hin. Zusätzlich wird durch die Bezeichnungen „superstrate-“ und „substrate-Konfiguration“ eindeutig beschrieben, ob der Herstellungsprozess mit der Licht zugewandten Seite (superstrate) begonnen hat, et vice versa. Das bedeutet beispielsweise, dass die Depositionsreihenfolge bei der Herstellung einer superstrate pin-Zelle mit der p-dotierten Schicht auf der Licht zugewandten Seite beginnt, anschließend die intrinsische Schicht folgt und schließlich die n-dotierte Schicht abgeschieden wird. Da bei photogenerierten Ladungsträgerpaaren die Beweglichkeit der Löcher geringer als die der Elektronen ist und der Großteil der einfallenden Strahlung hauptsächlich in der oberen Hälfte der photoaktiven Schicht absorbiert wird (vgl. Kap. Lichtabsorption), wird zur Verringerung der Rekombinationswahrscheinlichkeit die superstrate-Konfiguration als pin-Struktur und die substrate-Konfiguration als nip-Struktur produziert[14].

Der aktuelle Wirkungsgradrekord einer a-Si:H-Zelle liegt bei 10,09 % [Green *et al.* 2013]; [Benagli *et al.* 2009]. Dabei handelt es sich um eine Zelle in der pin-Struktur, hergestellt mittels LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition)[15]. Wie bereits erwähnt, unterliegen PV-Zellen aus amorphem Silizium durch den Staebler-Wronski-Effekt einer Wirkungsgrad-reduzierung, weshalb Wirkungsgradangaben für auf amorphem Silizium basierende Dünnschichttechnologien immer auf den degradierten Zustand bezogen sind.

[14] Dies trifft für die amorphe Solarzellentechnologie zu. Bei anderen Ansätzen, wie beispielsweise bei mikrokristallinen Solarzellen, können auch superstrate-Konfigurationen als nip-Struktur ähnliche Wirkungsgrade wie pin-Strukturen erreichen. [Gross *et al.* 2001]

[15] Aus der Literatur lässt sich nicht erkennen, ob es sich dabei um eine superstrate- oder substrate-Konfiguration handelt. Allerdings ist durch den, im Vergleich zu ähnlichen amorphen Siliziumzellen, hohen Wirkungsgrad und keiner expliziten Kennzeichnung einer oppositiven Handhabe zum üblichen Ansatz bei der Produktion von pin-Strukturen von einer superstrate-Konfiguration auszugehen.

3.4.2.3 Stapelzellen (Tandem- und Tripelzellen)

Neben der Nutzung einer einzelnen pin-Struktur in einer a-Si:H Solarzelle existieren auch Zellenkonzepte die aus mehr als einer pin-Zelle bestehen. Dabei handelt es sich um sogenannte Stapelzellen. Die Stapelung zweier pin-Strukturen wird als Tandemzelle, die Stapelung dreier pin-Strukturen wird als Tripelzelle bezeichnet. Die einfachste Form der Tandemzelle entspricht der Stapelung von zwei a-Si:H-Zellen mit der gleichen Bandlücke. Die jeweilige intrinsische Lage der beiden pin-Strukturen unterscheidet sich dabei nur in der gewählten Schichtdicke. Eine Tandemzelle mit dem gleichen Absorptionsmaterial, wie eine a-Si:H / a-Si:H-Zelle, trägt die Bezeichnung „same bandgap tandem cell“ [Zeman 2006, S. 215]. Der Vorteil einer Tandemzelle mit den gleichen Absorptionsmaterialien verglichen mit einer Tandemzelle aus verschiedenen Absorptionsmaterialien findet sich in der einfacheren Produktion und den damit verbundenen geringeren Kosten. Dieser Vorteil wird allerdings durch keine nenneswerte Auswirkung auf den Wirkungsgrad (aktuell für eine a-Si:H / a-Si:H Tandemzelle: 10,1 %) kompensiert, weshalb dieses Zellenkonzept industriell keine Rolle spielt. Zur Erhöhung des Wirkungsgrades wird deshalb ein Ansatz mit unterschiedlichen Absorptionsmaterialien verfolgt. Diese haben das Ziel durch unterschiedliche Bandlücken der intrinsischen Schicht das Strahlungsspektrum effizienter zu nutzen. Dafür werden die beiden pin-Strukturen auf bestimmte Spektralbereiche hin optimiert. Dieses Zellkonzept fordert eine größere Bandlücke der strahlungsquellenzugewandten Absorptionsschicht als die der anderen Teilzelle. So wird durch Verringerung der oberen intrinsischen a-Si:H Schichtdicke eine Transparenz für langwelliges Licht geschaffen. Dieses wird in der zweiten, speziell für diesen Spektralbereich (Rot bis Anfang Infrarot) ausgelegten, mit Germanium versetzten intrinsischen a-SiGe:H Schicht einer Bandlücke von 1,4 eV absorbiert. Das Konzept einer Multischichtzelle (Tandem, Tripel, Vierschicht et cetera) mit verschiedenen Bandlücken der einzelnen Absorptionsschichten ist als „Lichtaufspaltung“ bekannt.

Wie Abbildung 3-22 zu entnehmen ist, weist die intrinsische Schicht der „oberen“ Teilzelle eine Bandlücke von 1,7 – 1,8 eV (in Abhängigkeit des Wasserstoffgehaltes) bei, im Vergleich zur Einschichtzelle, reduzierter Schichtdicke auf. Weiter besitzt deren p-dotierte Schicht durch den Versatz mit Kohlenstoff eine erhöhte Bandlücke, da sie, genau wie bei einer einfachen pin-Struktur, als sogenannte Fensterschicht fungiert. Das Verhältnis des Versatzes der intrinsischen Schicht der „unteren“ Teilzelle mit Germanium

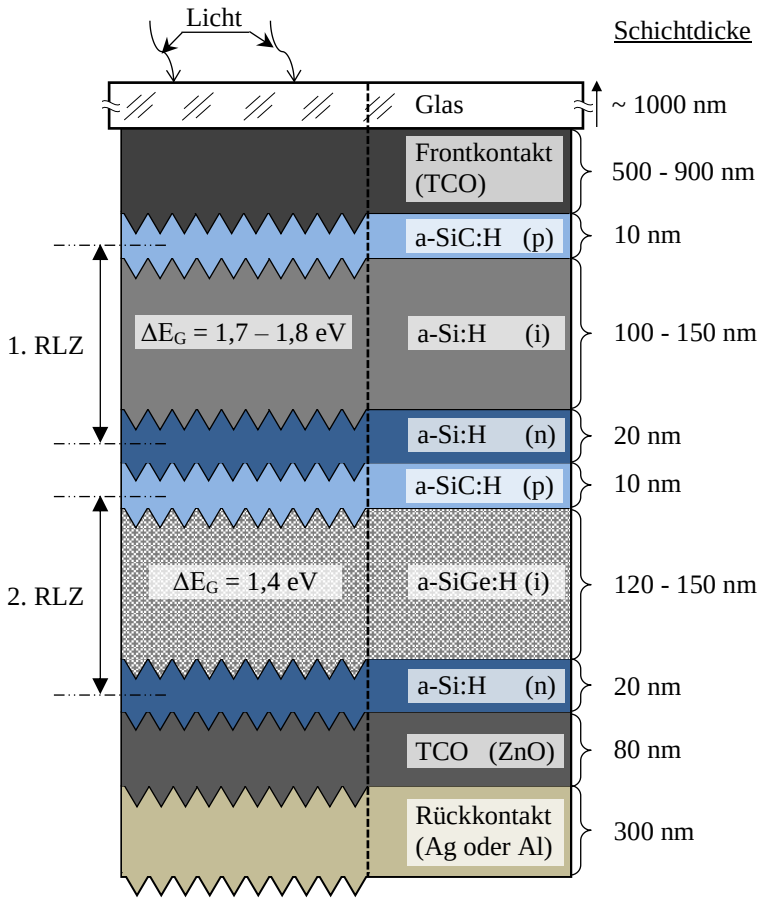


Abbildung 3-22: Zweidimensionaler Detaillausschnitt einer Superstrate Tandemzelle.

wird bei Tandemzellen in der Regel so gewählt, dass sich, aus dem oben genannten Grund, eine Bandlücke von 1,4 eV ergibt. In solchen a-Si:H / a-SiGe:H Tandemzellen sind die Schichtdicken indes nicht zufällig gewählt, da der Aufbau einer Multischichtzelle weitaus komplexer als der einer Einschichtzelle ist. Die grundlegende Funktionsweise einer Tandemzelle entspricht dabei einer Reihenschaltung von zwei Einschichtzellen. Der Gesamtstrom wird somit durch die schwächere Zelle bestimmt. Um Verluste zu vermeiden, sollten demnach beide Teilzellen den gleichen Strom generieren. Da die Höhe der Stromgenerierung einer Zelle im Wesentlichen von der Absorptionsgüte in der intrinsischen Schicht der Zelle abhängt, müssen dafür die Dicken der Absorptions-schichten der einzelnen Teilzellen für gegebene Randbedingungen zur Erfüllung des Zweckes möglichst gut aufeinander abgestimmt werden – es handelt sich um das sogenannte „current matching“. Der Idealfall, dass beide Teilzellen den gleichen Strom generieren, kann nur für ein gegebenes Spektrum einer Strahlung erreicht werden. Ändert sich entweder das Spektrum oder einer der Randbedingungen, durch beispielsweise unterschiedliches Degradationsverhalten der einzelnen Teilzellen, kommt es zu Verlusten. Für Tandemzellen wie in Abbildung 3-22 dargestellt, wird „current matching“

für eine Dicke der Absorptionsschicht der oberen Teilzelle (a-Si:H) von 100 bis 150 nm und einer Absorptionsschichtdicke der unteren Teilzelle (a-SiGe:H) von 120 bis 150 nm erreicht [Zeman 2006, S. 216].

Zur weiteren Verbesserung der Lichtaufspaltung wird der Tandemzelle eine weitere Teilzelle mit einer intrinsischen a-SiGe:H-Schicht einer Bandlücke von 1,6 eV zugefügt. Hervorzuhebende Wirkungsgrade einer auf amorphem Silizium basierenden Tripelzelle erreicht eine substrate Konfiguration in nip-Struktur. Diese bereits seit Mitte der 1990er von der Firma United Solar Ovonic produzierte Tripelzelle ist auf eine flexible Edelstahlfolie (Substrate) aufgebracht und in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

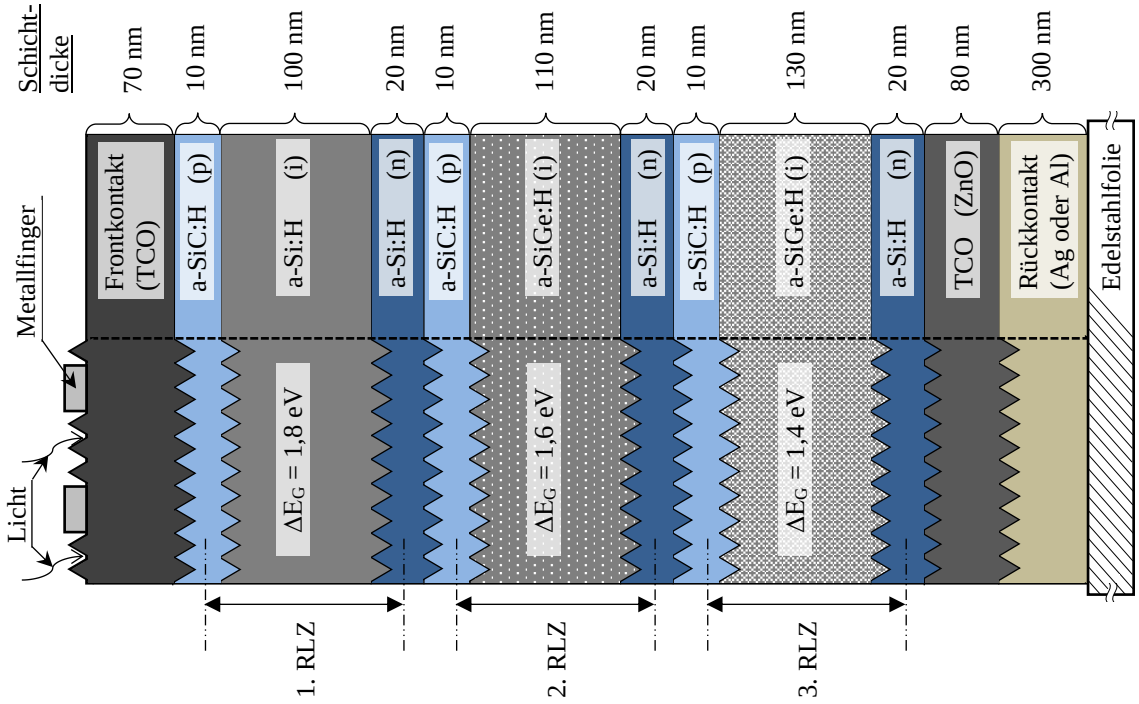


Abbildung 3-23: Zweidimensionaler Detaillausschnitt einer a-Si:H / a-SiGe:H / a-SiGe:H Tripelzelle als Substratekonfiguration in nip-Struktur.

Die Strahlung tritt durch ein Indium-Zinn-Oxid (ITO) über der ersten p-dotierten Schicht (Fensterschicht) in die Zelle ein. Das ITO mit einer Dicke von rund 70 nm besitzt die Funktion eines TCO als Elektrode und dient gleichzeitig als Antireflexionsschicht. Wenngleich auf dem ITO noch Metallfinger zur Reduzierung des elektrischen Widerstandes aufgebracht sind, bewirken diese aber auch einen Verschattungsverlust von 10 % [Shah 2012, S. 256]. Durch das Auftragen auf eine flexible Edelstahlfolie können so schwer zerbrechbare, leichtgewichtige und biegbare Module beispielsweise für eine gebäudeintegrierte Photovoltaik produziert werden. Die folgende Abbildung 3-24 stellt die

externen Quantenwirkungsgrade der einzelnen Teilzellen dem sich daraus ergebenden externen Quantenwirkungsgrad der Gesamtzelle gegenüber. Der externe Quantenwirkungsgrad ergibt sich aus nachstehender Beziehung:

$$\eta_{Ext} = \frac{Anzahl\ für\ Photostrom\ nutzbare\ Ladungsträgerpaare}{Anzahl\ gesamt\ auftreffender\ Photonen}$$ **Formel 3-8**

Zusätzlich sind die Kurzschlussströme der einzelnen Teilzellen angegeben. Deren Vergleich macht das für dieses Zellendesign gelungene „current matching“ deutlich.

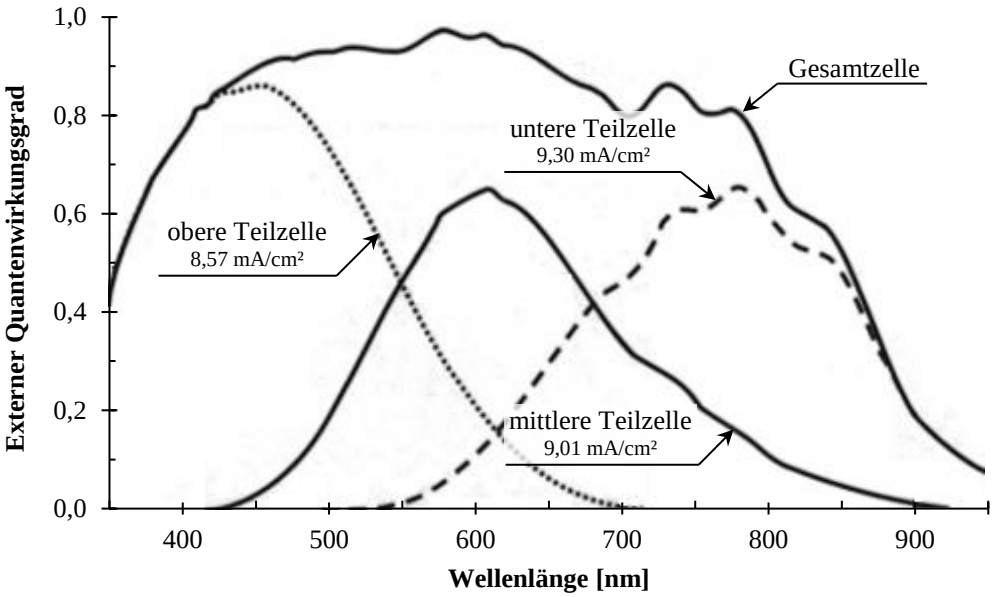


Abbildung 3-24: Externe Quanteneffizienz der Tripelzelle aus Abbildung 3-23 (vorherige Seite). Die einzelnen Zellen sind für die jeweiligen Wellenlängen ausgelegt. Originaldaten und Abbildung nach [Yang 1997].

Die Wirkungsgradreduktion durch lichtinduzierte Degradation beläuft sich auf knapp 11 %. Dieser im Gegensatz zu Einschichtzellen aus amorphem Silizium (15 – 30 %) geringerer Wirkungsgradverlust spiegelt einen weiteren Vorteil der Stapelzellentechnologie wieder. Da die einzelnen Teilzellen auf spezielle Spektralbereiche hin optimiert sind, können die Teilzellen wesentlich dünner ausgeführt werden. Wie bereits beschrieben, erhöht sich der Staebler-Wronski-Effekt mit zunehmender Schichtdicke. Durch die dünneren Teilzellen entsteht so ein stärkeres elektrisches Feld über die intrinsischen Lagen und verringert damit die Degradation.

3.4.2.4 Zellen aus mikrokristallinem Silizium

Durch Variation des Wasserstoffverdünnungsverhältnisses R_H während der plasmaunterstützten chemischen Gasphasenabscheidung (PECVD) können gezielt unterschiedliche Kristallisationsformen des amorphen Siliziums erzeugt werden. Das Verhältnis R_H versteht sich dabei als Quotient aus Menge an gasförmigem Wasserstoff und Menge an gasförmigem Silan, welches dem Produktionsprozess zugrunde gelegt wird.

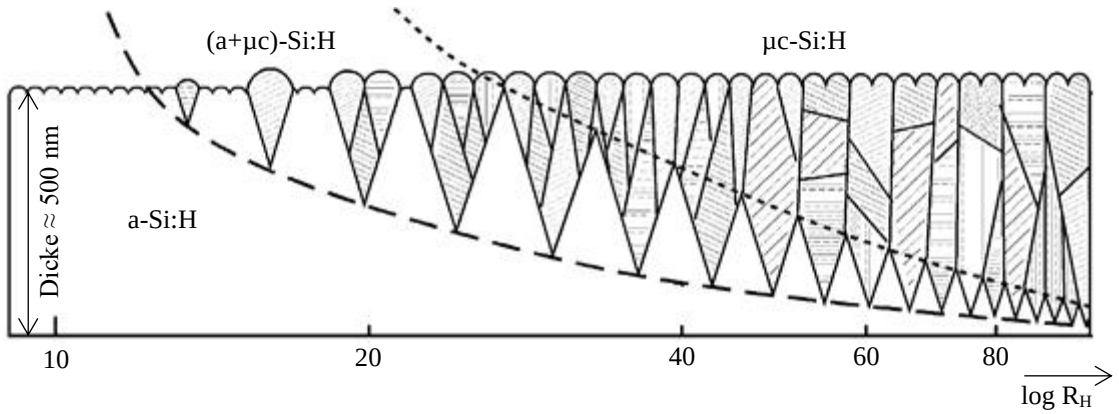


Abbildung 3-25: Kristallisationsformen während des PECVD-Verfahrens in Abhängigkeit des Wasserstoffverdünnungsverhältnisses bei einem typischen Druck von 2 bis 3 mmHg und einer Plasmaanregungsfrequenz von 13,56 MHz. Abbildung nach [Collins und Ferlauto 2002].

Wie in Abbildung 3-25 dargestellt, können sich so in Abhängigkeit der zu produzierenden Schichtdicke im Kern drei unterschiedliche Typen ergeben:

- für kleine *R*: wasserstoffpassivierte amorphe Siliziumschichten → a-Si:H
- für höhere *R*: Mischphasen aus wasserstoffpassivierten amorphen Siliziumschichten und wasserstoffpassivierten mikrokristallinen Siliziumschichten → (a+µc)-Si:H
- für höhe *R*: wasserstoffpassivierte mikrokristalline Siliziumschichten → µc-Si:H

Die erste detaillierte Beschreibung von mikrokristallinem Silizium fand 1968 durch [Vepřek und Mareček 1968] statt. Aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften beschränkte sich die Anwendung von mikrokristallinem Silizium in der Solartechnik anfangs auf die Verwendung als p-dotierte Fensterschichten. 1994 wurde durch das Institut für Mikrotechnik der Universität Neuchâtel erstmals eine Solarzelle als pin-Struktur aus mikrokristallinem Silizium mit einem Wirkungsgrad von 4,6 % vorgestellt. [Meier *et al.* 1994] Wenngleich mikrokristallines Silizium mit der gleichen Anlagentechnologie wie amorphes Silizium produziert werden kann (lediglich die Prozessparameter müssen, wie bereits aufgezeigt, angepasst werden), zeigt ein Vergleich

zwischen wasserstoffpassiviertem intrinsischem mikrokristallinem Silizium und seinem amorphen Pendant folgende grundlegende Unterschiede der Materialeigenschaften auf:

- µc-Si:H besitzt eine höhere Empfindlichkeit bezüglich Verunreinigungen[16],
- ähnlich wie kristallines Silizium ist µc-Si:H ein indirekter Halbleiter mit einer Bandlücke von 1,1 eV,
- µc-Si:H besitzt somit einen geringeren Absorptionskoeffizienten für Licht der Wellenlänge zwischen 390 und 750 nm. Folglich müssen Solarzellen aus µc-Si:H zur Absorption der verfügbaren Strahlung dicker ausgeführt werden als a-Si:H-Solarzellen. Gleichwohl sollte auch das Light Trapping effizienter gestaltet sein als bei einer amorphen Zelle und
- der Effekt der lichtinduzierten Degradation (Staebler-Wronski-Effekt) tritt in µc-Si:H nicht auf.

Allerdings bestehen µc-Si:H Solarzellen aus einer Mischphase von mikrokristallinem und amorphem Silizium. Somit ist die Namensgebung an dieser Stelle etwas irreführend. Die Mikrostruktur von mikrokristallinem Silizium ist hochkomplex. Sie besteht aus zwei Phasen – der mikrokristallinen selbst und einer amorphen Phase. Einzeln betrachtet besitzen die mikrokristallinen Siliziumkörner Dimensionen im Nanometerbereich (10 bis 100 nm)[17], welche wiederum in Konglomeraten mit Dimensionen größer als 1 µm zusammengepackt sind (daher auch die Namensgebung: mikrokristallines Silizium). Nicht die Korngrenzen selbst, sondern vielmehr die Grenzen der Konglomerate limitieren den Transport und somit die Ladungsträgersammlung in µc-Si:H-Solarzellen. In heutigen µc-Si:H-Solarzellen erstrecken sich diese in amorphes Silizium eingebetteten Konglomerate über die gesamte intrinsische Schicht. Somit können generierte Ladungsträger ohne überschreiten einer Konglomeratsgrenze in die p- beziehungsweise n-dotierten Schichten gelangen. Weiter führt das amorphe Siliziumbett zur Passivierung der Konglomeratsgrenzen. Typische Anteile der beiden Phasen belaufen sich auf jeweils 50 %. Wenngleich Einschichtzellen aus µc-Si:H im Labormaßstab derzeit Wirkungsgrade von rund 10 % erreichen, finden sie kaum Anwendung in kommerziellen Solarmodulen. Vielmehr wird die Technologie der mikrokristallinen Siliziumzelle in Verbindung mir amorphem Siliziumschichten in Tandemzellen genutzt. Dabei dient die mikrokristalline Teilzelle auf Grund ihrer physikalischen Eigenschaften als indirekter Halbleiter mit einer

[16] Durch Reduzierung der Sauerstoffkontaminationen konnte bereits 1996 eine Laborzelle mit 7 % Wirkungsgrad hergestellt werden.
[17] Deshalb wird auch häufig der Begriff nanokristallines Silizium (nc-Si:H) verwendet.

Bandlücke ähnlich von kristallinem Silizium als Bodenzelle zur Absorption der nicht von der oberen amorphen Teilzelle (Bandlücke 1,7 bis 1,8 eV) absorbierten Strahlung nahe des infraroten Bereiches. Durch die Kombination beider Kristallisationsformen werden solche Tandemzellen als mikromorphe Tandemzellen bezeichnet (mikrokristallin und amorph). Diese besitzen im Vergleich zur a-Si:H / a-Si:H – Tandemzelle den Vorteil, dass die untere Teilzelle keiner lichtinduzierten Wirkungsgradreduktion unterliegt. Solche Labortandemzellen in pin-pin-Strukturen aus a-Si:H / µc-Si:H , wie in Abbildung 3-26 dargestellt, erreichen einen Wirkungsgrad von 12,3 % [Green *et al.* 2013].

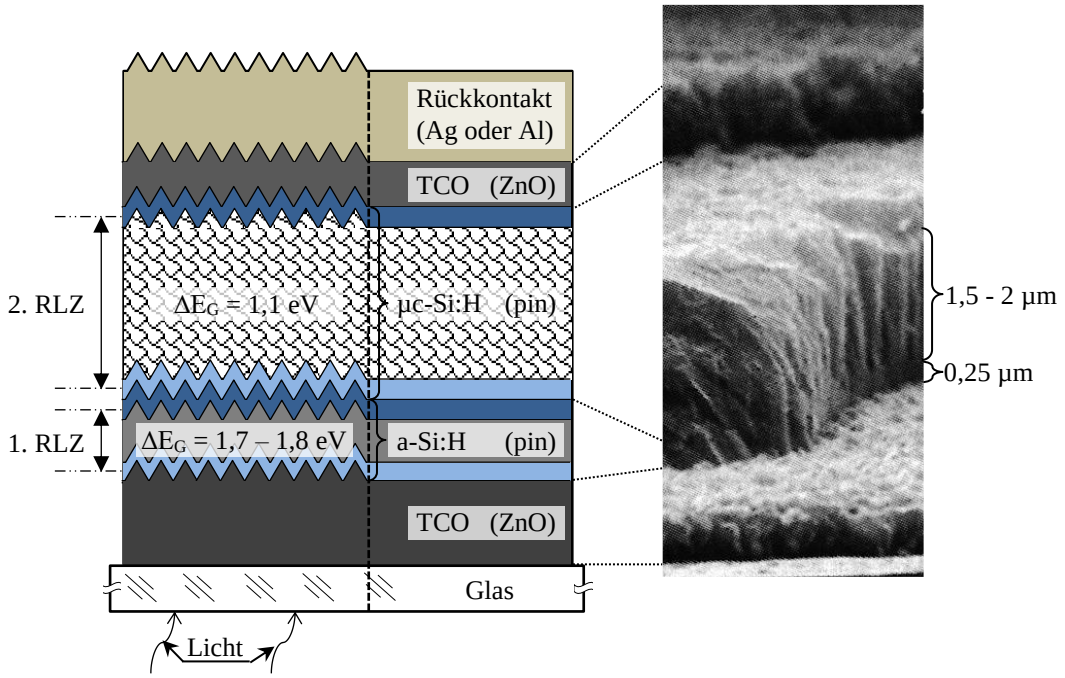


Abbildung 3-26: Links: Zweidimensionaler Detaillausschnitt einer mirkomorphen Tandemzelle. **Rechts:** Abbildung mittels eines Mikroelektronenmikroskops aus [Shah 2012].

Derweilen fokussiert sich die Wissenschaft auf Tripelzellen im Mikromorphdesign. Dabei gibt es unterschiedlichste Ansätze. Derzeit vielversprechende Kombinationen sind:

- a-Si:H / a-Si:H / µc-Si:H
- a-Si:H / a-SiGe:H / µc-Si:H
- a-Si:H / µc-Si:H / µc-Si:H

In allen Fällen besteht die Tripelzelle au seiner amorphen Frontzelle und einer mikrokristallinen Bodenzelle. Die Variation findet in der mittleren Zelle statt. Im Falle einer a-Si:H Teilzelle wirkt sich der eintretende Staebler-Wronski-Effekt nachteilig aus; bei der Verwendung einer a-SiGe:H die zusätzlich hohen Germaniumkosten. Der Wirkungsgradrekord mikromorpher Tripelzellen liegt bei 13,4 % (a-Si:H / µc-Si:H / µc-Si:H) [Green *et al.* 2013]. [Shah 2012, S. 259]

Die Herstellung und Verwendung von µc-Si:H-Schichten bringt aber auch einige Schwierigkeiten mit sich [Shah 2012, S. 213]:

- Das Kristallwachstum ist subtratabhängig.
- Das Wasserstoff-Silan-Verhältnis muss während der Produktion variiert werden. Bei konstantem Verhältnis würde das Wachstum mit einem relativ großen amorphen Anteil beginnen und mit steigender Schichtdicke mehr und mehr kristallin werden. (vgl. Abbildung 3-25)
- Wie bereits erwähnt ist µc-Si:H empfindlich bezüglich Verunreinigungen.
- Einzelne µc-Si:H-Schichten zeigen mitunter während der Lagerung Degradationseffekte im Dunkeln. Das ist wahrscheinlich auf die Absorption von Sauerstoff und einer daraus folgenden Oxidation zurückzuführen, kann jedoch durch eine Lagerung im Vakuum oder Inertgas verhindert werden.

3.4.3 Cadmiumtelluridzellen

Cadmiumtellurid (CdTe) ist ein II-VI Verbindungshalbleiter, bestehend aus dem Übergangsmetall Cadmium (2. Hauptgruppe) und dem Halbmetall Tellur (6. Hauptgruppe). Bedingt durch seine Eigenschaften eignet es sich hervorragend für den Einsatz in der Dünnschichtzellentechnologie. Als direkter Halbleiter mit einer Bandlücke von 1,44 eV bei 300 K und ähnlichem Absorptionskoeffizienten wie amorphes Silizium (vgl. Tabelle 2-9, Kapitel 2.5) kann das Material bei einer Dicke von wenigen Mikrometern fast das gesamte einfallende solare Spektrum absorbieren. Der theoretische Wirkungsgrad liegt mit 29,7 % nahe am Optimum (vgl. Abbildung 3-16, Kapitel 3.3.5). Intrinsisches Cadmiumtellurid besitzt durch eine kleine, natürliche Abweichung der Stöchiometrie hin zur tellurreichen Seite in Form von Cadmiumfehlstellen von Haus aus eine leichte p-Dotierung, die für die Dünnschichtzellentechnologie je nach Anwendungsfall ausreichend sein kann. [Shah 2012, S. 286] Diese nativen Cadmiumfehlstellen wirken als Akzeptoren und führen zu einer intrinsischen p-Dotierung von rund 10^{15} cm^{-3}. Laut [Kraft 2011, S. 9] können gezielt zugegebene Fremdatome sowohl durch die Bildung von Komplexen mit den Cadmiumfehlstellen bei Besetzung eines Tellurplatzes im Gitter als Akzeptoren fungieren, als auch an einen regulären Gitterplatz treten und so die effektive p-Dotierung ansteigen lassen. Folgende Tabelle 3-9 stellt mögliche Dotieratome ihrer Wirkung gegenüber.

Tabelle 3-9: Akzeptor- und Donatorartige Defektzustände, wobei die Energienieveaus für die Akzeptoren von der Valenzbandoberkante und für die Donatoren von der Leitungsbandunterkante in eV angegeben sind. Daten nach [Kraft 2011, S. 9] und [Burgelman 2006, S. 282].

Klasse		Dotieratom	Niveau in [eV]	Seite	Wirkung
	Gruppe III Elemente	Al - Aluminium Ga - Gallium In - Indium	0,03 0,24 0,05	Cadmium	Donator
	Gruppe VII Elemente	F - Fluor Cl - Chlor Br - Brom I - Iod	0,87 0,35 0,22 0,04	Tellur	Donator
	Gruppe I Elemente	Li - Lithium Na - Natrium	- 0,02	Cadmium	Akzeptor
	Nebengruppe Ia Elemente	Cu - Kupfer Ag - Silber Au - Gold	0,22 0,15 0,20	Cadmium	Akzeptor
	Gruppe V Elemente	N - Stickstoff P - Phosphor As - Arsen Sb - Antimon	0,01 0,05 0,10 0,23	Tellur	Akzeptor
	Natürliche Defekte	einfache Fehlstelle Cd	0,13		Akzeptor
		einfache Fehlstelle Tellur	0,34		Donator

Abbildung 3-27 zeigt den typischen Aufbau einer CdTe-Superstratzelle.

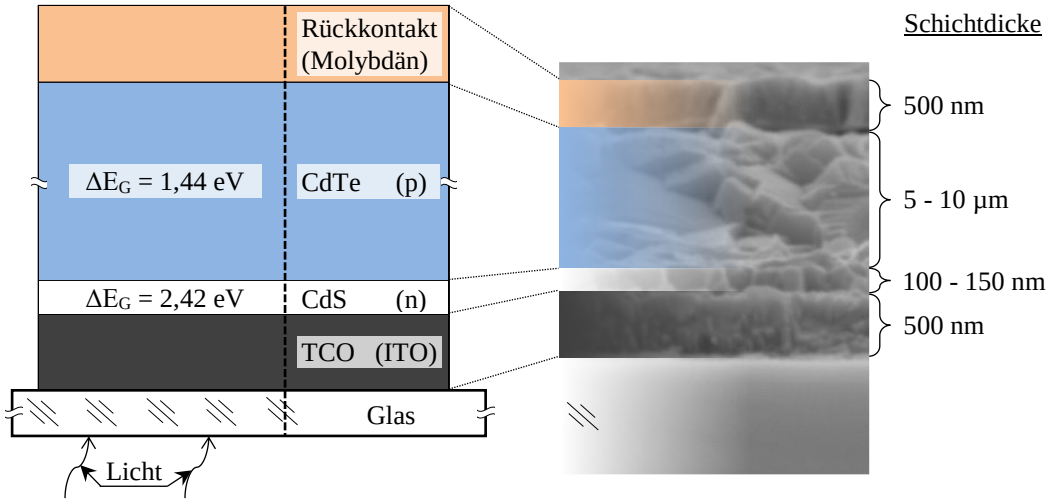


Abbildung 3-27: Zweidimensionaler Detaillausschnitt einer Cadmiumtellurid-Superstratzelle inklusive einer REM-Bruchkantenaufnahme der Schichtstruktur aus [Kraft 2011, S. 10].

In der abgebildeten Superstratekonfiguration wird auf das Glassuperstrat eine TCO-Schicht (typischerweise ITO, ZnO oder eine Kombination aus beiden)[18] als Frontkontakt aufgebracht. Partiell finden auch texturierte TCOs zur Verbesserung der Lichteinkopplung mittels Light Trapping Anwendung. [Hädrich 2009, S. 7] Zwischen TCO und der p-dotierten CdTe-Schicht wird eine n-dotierte CdS-Fensterschicht mit einer Schichtdicke von 100 bis 150 nm eingebracht. Als Heteropartner zur CdTe-Schicht dient sie der Bildung des pn-Übergangs. CdS besitzt bei 300 K eine Bandlücke von 2,42 eV. Analog umgekehrt zu CdTe weist intrinsisches CdS eine natürliche n-Dotierung resultierend aus einer geringen stöchiometrischen Abweichung auf.

Wenngleich, bedingt durch seine optischen Eigenschaften, Schichtdicken von 1 bis 2 µm für die Absorption der einfallenden Strahlung ausreichend sind, wird die sich anschließende CdTe-Schicht in der Regel mit einer Dicke von 5 bis 10 µm ausgeführt. Dies begründet sich in der Notwendigkeit einer geschlossenen Schichtstruktur, um Kurzschlüsse zu vermeiden. [Hädrich 2009, S. 7f] Die CdTe-Schicht stellt die eigentliche Absorptionsschicht dar. Durch den hohen Absorptionskoeffizienten von CdTe werden die meisten Elektronen-Loch-Paare nahe der Schnittstelle am pn-Übergang erzeugt. Genau wie beim pn-Übergang in der kristallinen Siliziumzellentechnologie werden die Ladungsträgerpaare durch das entstandene elektrische Feld getrennt, wobei die Elektronen durch die CdS-Schicht zum Frontkontakt gelenkt werden. Obwohl beide Materialien, CdTe und CdS, II-VI-Verbindungshalbleiter sind und sich chemisch ähneln, funktioniert deren Kontaktierung nicht reibungslos. Grund sind ihre unterschiedliche Gitterkonstanten[19], welche circa um 5 % differieren. Bei Kontaktierung der beiden Schichten entstehen so Gitterfehlanpassungen, welche als starke Rekombinationszentren wirken. CdTe-Solarzellen in der angegebenen Struktur können ohne weitere Behandlungsmaßnahmen lediglich Wirkungsgrade von rund 2 % erreichen. Die Erhitzung des Systems auf 400 °C führt zwar zu einer geringen Verbesserung, jedoch werden Wirkungsgrade von über 16 % erst durch eine „Aktivierung“ des Komplexes erreicht. Dafür werden die Schichten auf Temperaturen zwischen 400 und 500 °C unter Zugabe einer chlorhaltigen Verbindung (meist $CdCl_2$) für ein paar Minuten erhitzt. Die Vorgänge während der Aktivierung sind gegenwärtig noch Bestandteil der Forschung und bislang nicht vollständig geklärt. Ein wichtiger Effekt der Aktivierung ist jedoch die Begünstigung der Durchmischung an der

[18] Aber auch Verbindungen wie Zn_2SnO_4 (ZTO) und Cd_2SnO_4 (CTO) wurden bereits erfolgreich als TCO-Schichten getestet. [Wu *et al.* 2001]

[19] CdTe besitzt eine kubische Zinkblendestruktur; CdS eine hexagonale Wurzitstruktur.

CdTe / CdS Schnittstelle. So diffundiert Schwefel aus der CdS-Schicht in die CdTe-Schicht und Tellur aus der CdTe-Schicht in die CdS-Schicht. Dieser Durchmischungseffekt ist für diese Solarzellentechnologie günstig, da die Gitterfehlanpassung zwischen CdTe- und CdS-Schicht verringert wird und somit die Anzahl struktureller Effekte direkt in der Grenzfläche abnimmt. Dies soll auch die folgende Gegenüberstellung untermauern.

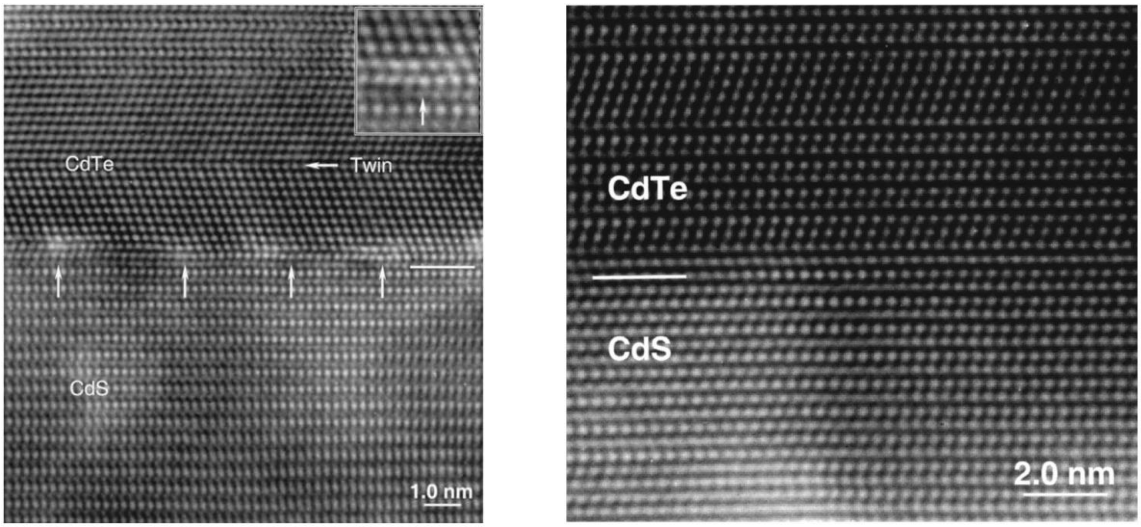


Abbildung 3-28: Darstellung der Schnittstelle zwischen CdTe- und CdS-Schicht entlang der [1120]-Zonenachse mittels hochauflösender Transmissionselektronenmikroskopie. **Links:** mit Gitterfehlanpassungen. **Rechts:** ohne Gitterfehlanpassungen. Abbildungen aus [Yan *et al.* 2001].

Experimentell wurde nachgewiesen, dass die Durchmischung von CdTe und CdS an der Grenzfläche eine Funktion der Behandlung mit $CdCl_2$ und der Substrattemperatur darstellt. Für weitere Informationen wird an dieser Stelle auf [Jahn *et al.* 2001], [Clemminck *et al.* 1991] und [McCandless *et al.* 2001] verwiesen.

Der sich an die CdTe-Schicht anschließende Rückkontakt stellt eine weitere Problematik dieser Dünnschichtzellentechnologie dar. Durch die geringe native p-Dotierung der CdTe-Schicht führt das direkte Aufbringen eines Rückkontaktes zu einem hohen Serienwiderstand. [Hädrich 2009, S. 12] Dies macht in der Konsequenz weitere technische Maßnahmen zur Erhöhung der Dotierung in der Grenzschicht vor dem Aufbringen des Rückkontaktes erforderlich. Eine verfahrenstechnische Möglichkeit stellt nasschemisches Ätzen mittels einer wässrigen Lösung aus Salpetersäure (HNO_3) und Phosphorsäure (H_3PO_4) zur Erzeugung einer tellurreichen, stark dotierten Grenzschicht dar. Dabei wird Te^{2-} zu elementarem Tellur oxidiert und gleichzeitig Cd^{2+} ausgelöst. Simultan werden aus der Aktivierung verbliebene Oxide und Rückstände von der Oberfläche entfernt. Eine Alternative zum Ätzverfahren stellt das Aufbringen einer

Zwischenschicht (Verbund aus einem Metall und Tellur) dar. Genau wie der Rückkontakt selbst, sollten mögliche Materialien, oder Kombinationen verschiedener Materialien, neben einem niedrigen ohmschen Widerstand auch chemische Stabilität aufweisen. Stabil meint, dass keine Fremdatome vom Rückkontakt in die Zelle diffundieren und keine chemischen Reaktionen zwischen CdTe-Schicht und verwendetem Material auftreten. Kupferhaltige Kontakte besitzen zwar gute initiale Eigenschaften, jedoch können sie über längere Zeit zu Problemen führen. So wurde nachgewiesen, dass Kupfer unter bestimmten Umständen durch die CdTe-Schicht in die CdS-Schicht diffundiert und sich dort anreichert. [Bätzner *et al.* 2004] Eine mögliche stabile kupferlose Rückkontaktierung findet derweilen häufig Anwendung; eine Kombination aus einer Sb_2Te_3-Zwischenschicht und Molybdän (Mo)[20]. Die folgende Abbildung 3-29 zeigt das Verhalten einer CdTe-Zelle mit verschiedenen Rückkontaktierungen.

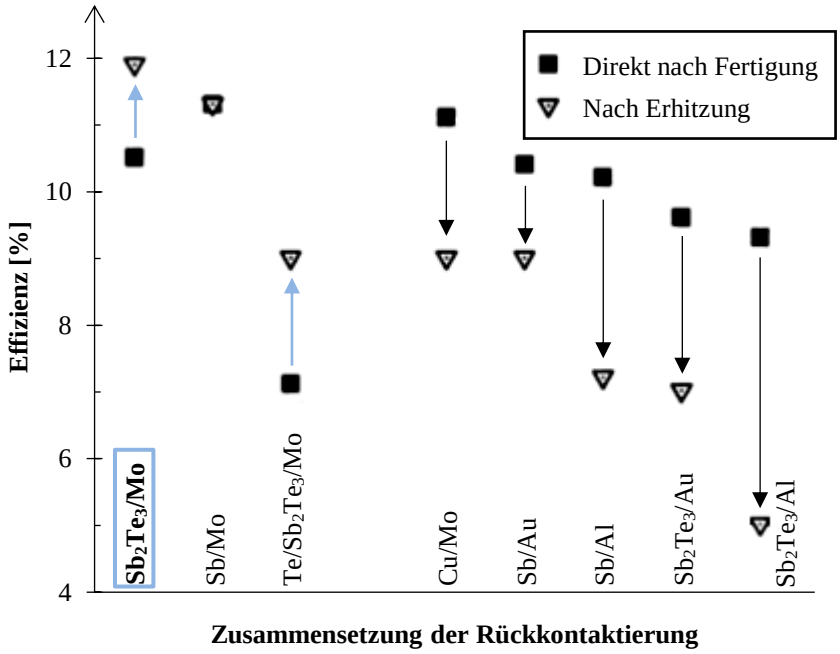


Abbildung 3-29: Effizienzen von CdTe-Zellen mit verschiedenen Rückkontaktierungen direkt nach der Fertigung und infolge einer Erhitzung auf 200 °C. Abbildung nach [Bätzner *et al.* 2004].

Da die Bindungsenergie zwischen CdTe und CdS höher ist, als die Energie eines jeden Photons des verfügbaren solaren Strahlungsspektrums, erfolgt kein Aufbrechen der chemischen Bindungen. Gleichwohl hat sie eine extrem hohe chemische und thermische Stabilität zur Folge, weshalb diese Materialeigenschaft das Degradationsrisiko minimiert. Vielmehr konnte bisher keine intrinsische Degradation der beiden Schichten beobachtet werden. [Bonnet 2012, S. 302]

[20] Ist ein Übergangsmetall mit hoher Leitfähigkeit.

Aktueller Wirkungsgradrekord von CdTe-Laborzellen liegt bei 19,6 % (Stand 2013) [NREL 2013]. Diese werden meist auf teurem Borosilikatglas gefertigt, was höhere Prozesstemperaturen als das in der kommerziellen Produktion verwendete Kalk-Natron-Glas erlaubt. Auch aus diesem Grund liegen die Wirkungsgrade kommerzieller Ableger dieser Technologie derzeit bei rund 12 %. Aktuelle ist die Verringerung der CdTe-Schichtdicke durch verfahrenstechnische Neuerungen in der Produktion Gegenstand der Forschung[21]. Gleichwohl rücken weiterführende Zellenkonzepte wie Tandemzellen in den Blickpunkt. [Gupta 2006] beispielsweise beschreibt ein Tandemzellenkonzept aus CdS / CdTe und CdS / HgCdTe[22] mit einer Effizienz von 11,2 %.

3.4.4 Zellen aus der Gruppe CIS/CIGS – $Cu(In,Ga)Se_2$

Hierzu werden alle Dünnschichtsolarzellen gezählt, deren Absorptionsschicht aus einer Materiallegierung besteht, die der Gruppe der Chalkopyrite zugeordnet werden kann. Die beiden Materialien $CuInSe_2$ und $CuGaSe_2$, aus denen $Cu(In,Ga)Se_2$-Legierungen gebildet werden, sind ternäre Verbindungshalbleiter, die die Gitterstruktur von Chalkopyrit (Kupferkies – $CuFeS_2$) besitzen. Diese Struktur ergibt sich, am Beispiel von $CuInSe_2$, aus der kubischen Zinkblendestruktur von ZnSe mittels alternierender Substitution der Zinkatome durch Kupfer- und Indiumatome.

Die Gruppe der Kupferchalkopyrite – $Cu(In,Ga,Al)(Se,S)_2$ sind direkte Halbleitermaterialien mit einer vom jeweiligen Mischungsverhältnis abhängigen Bandlücke. Die folgende Abbildung 3-30 stellt die Bandlücken (bei 300 K) der verschiedenen Legierungen der zugehörigen Gitterkonstante gegenüber. Die angegebenen Verbindungen können ohne die Existenz einer Mischungslücke Legierungen formen, weshalb neben einer Anpassung der Gitterkonstante auch eine Optimierung der Bandlücke möglich ist.

Vorteile ternärer Verbindungen wie Kupferchalkopyrite und deren Legierungen sind:

- die Möglichkeit sie mit Hilfe von nativen Defekten zu dotiert,
- ihre Toleranz bezüglich großen stöchiometrischen Abweichungen und
- die elektrische Neutralität von strukturellen Defekten des Materials.

[21] Derzeit noch 5 bis 10 µm dick, wobei eine Schichtdicke von nur 1 bis 2 µm ausreichend für die Absorption des solaren Spektrums ist (vgl. Seite 135).

[22] Bei der Verwendung von Quecksilber in photovoltaischen Halbleitermaterialien ist dessen Nutzen ökologischen Fragestellungen gegenüberzustellen.

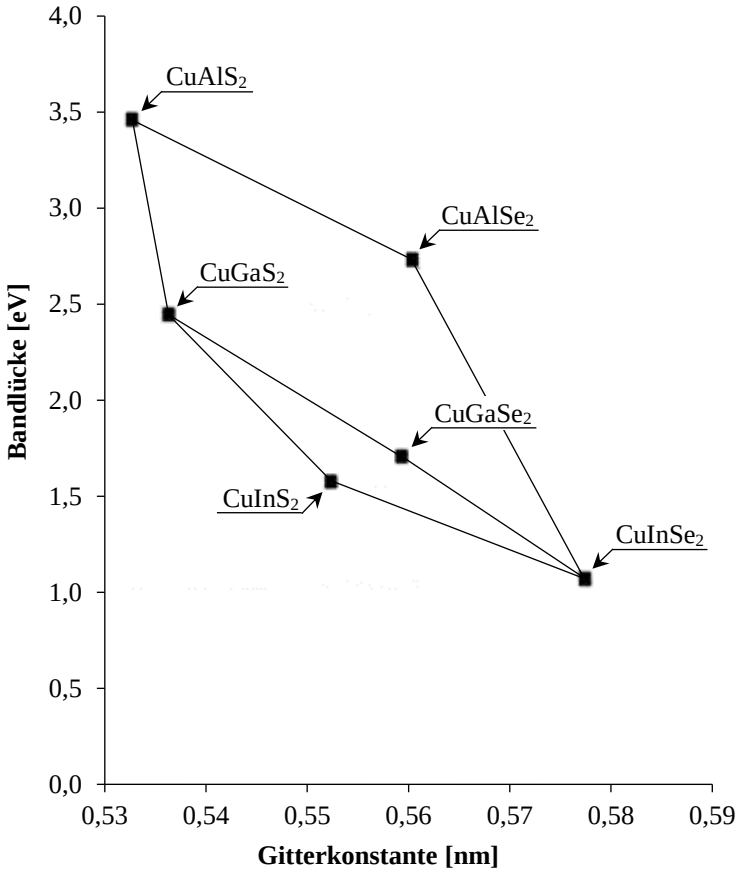


Abbildung 3-30: Bandlücken verschiedener Legierungen der Chalkopyrite und zugehörige Gitterkonstante. Abbildung nach [Rau und Schock 2012].

Die p-Dotierung der Materialien erfolgt über intrinsische Defekte. Um Beispielsweise intrinsisches, p-dotiertes $CuInSe_2$ zu erhalten, wird kupferarmes Material unter hohem Selendampfdruck erhitzt. Die sich ergebende Kupferfehlstelle stellt den dominanten Akzeptor dar. [Rau und Schock 2012, S. 328] Ohne zusätzliche Dotierung liegt die Ladungsträgerdichte (Löcher bei p-Dotierung) für Kupferchalkopyrite normalerweise bei 10^{14} bis 10^{17} cm^{-3} und ist damit für optoelektrische Anwendungen ausreichend. [Klenk und Lux-Steiner 2006, S. 250]

Die meisten, auf Kupferchalkopyriten basierende Hocheffizienzzellen werden als Substratkonfiguration hergestellt. Als Substrat eigenen sich neben Glas auch biegsame Polymere oder Metallfolien. Jedoch zeigen Solarzellen auf Kalk-Natron-Glassubstrat die besten Wirkungsgrade. [Rockett 2010] Auf das Substrat wird eine 1 µm dicke Molybdänschicht aufgebracht, die als opaker Rückkontakt dient. Dabei spielen die Eigenschaften des Molybdäns und die Wahl des Glassubstrates eine wichtige Rolle für die Qualität der Solarzelle. Der Wechsel von natriumfreien Glas zu Kalk-Natron-Glas bewirkte einen Anstieg in der Effizienz der fertigen Zelle. Grund hierfür ist die Existenz und das Wirken

von Natrium, welches während des Herstellungsprozesses vom Glas durch die Molybdänschicht in den sich anschließenden Kupferchalkopyritabsorber diffundiert. [Singh und Patra 2010] Die positive Wirkung von Natrium auf die Absorptionsschicht während deren Wachstumsmechanismen ist im Wesentlichen auf eine verbesserte Morphologie und eine höhere effektive p-Dotierung zurückzuführen. [Klenk und Lux-Steiner 2006, S. 243] Wird kein natriumhaltiges Substrat verwendet (Metallfolie, Polymer et cetera), befindet sich zwischen der Molybdänschicht und der folgenden Absorptionsschicht eine natriumhaltige Zwischenlage (NaF, Na_2Se, oder Na_2S). Diese dient der kontrollierten, homogenen Natriumabgabe in den Absorber, weshalb diese Technik teilweise auch bei Kalk-Natron-Glassubstraten angewendet wird. Zusätzlich wird dann zwischen Substrat und Molybdänschicht eine Blockschicht aus Siliziumnitrid[23] eingebaut, um die Diffusion von Natrium aus dem Substrat zu unterbinden. Abbildung 3-31 zeigt einen typischen Aufbau einer auf Kalk-Natron-Glassubstrat basierenden Kupferchalkopyritsolarzelle.

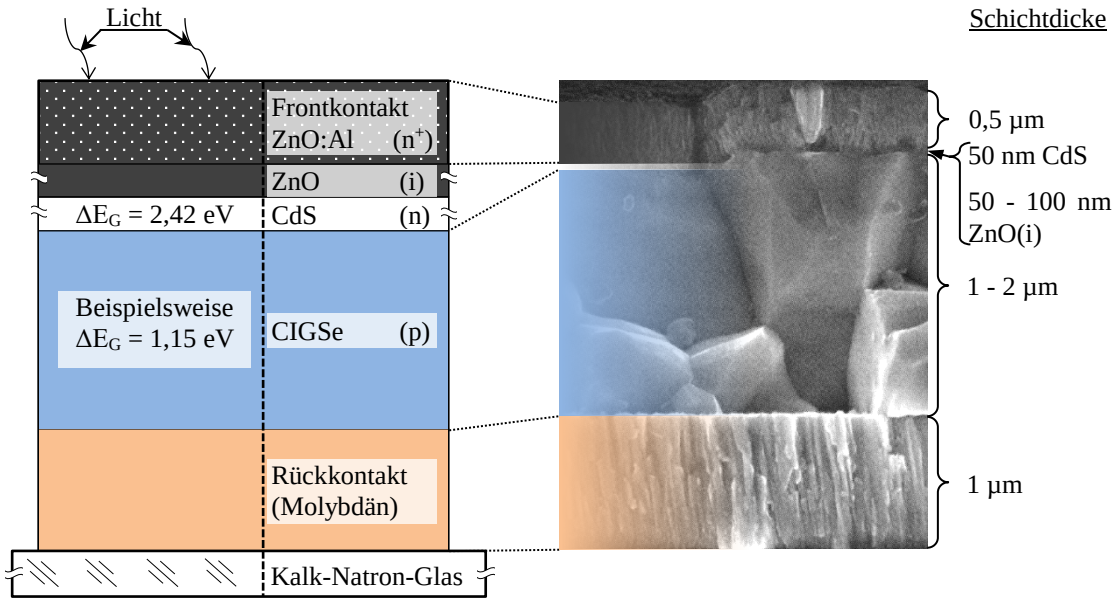


Abbildung 3-31: Zweidimensionaler Detaillausschnitt einer Standard-ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se_2-Zelle inklusive einer REM-Bruchkantenaufnahme der Schichtstruktur aus [Klenk und Lux-Steiner 2006; S. 239].

Frühe Zellenkonzepte besaßen eine Absorptionsschicht aus $CuInSe_2$ (CISe). Derweilen findet ein partieller Austausch des Indiumanteils durch Germanium statt. Für das Material $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ (CIGSe) kann so der Bandabstand des verwendeten Materials auf den Wirkungsgrad hin optimiert werden. In der Materialkombination gibt x den Galiumanteil an. Für x = 0 ergibt sich $CuInSe_2$ mit einer Bandlücke von 1,04 eV und für x = 1 $CuGaSe_2$ mit einer Bandlücke von 1,68 eV. Ein Germaniumanteil von 10 – 30 %, einhergehend mit

[23] Siliziumdioxid und Chrom finden ebenfalls Verwendung. [Rau und Schock 2012, S. 333]

einer Bandlückenvergrößerung von 1,04 eV auf 1,1 – 1,2 eV, führt neben der Anpassung der Bandlücke an das solare Spektrum auch zu einer verbesserten elektronischen Qualität der Absorptionsschicht. [Hanna *et al.* 2000] Weiter gibt es neuere Ansätze, die Schwefel gezielt in die Verbindung mit einbauen, um Cu(In,Ga)(Se,S)$_2$-Verbindungen (CIGSSe) zu erhalten. Alle genannten Absorberverbindungen benötigen jedoch eine optimale Natriumkonzentration für geeignete optoelektrische Eigenschaften. Andere Ansätze gehen von einer $CuInS_2$-Verbindung (CIS) aus, die unter Kupferüberschuss hergestellt wird und eine Bandlücke von 1,5 eV besitzt. Zellenkonzepte mit CIS-Absorptionsschichten benötigen keine zusätzlichen Elemente wie Gallium und Natrium. Neben der Vielzahl weiterer Materialien für die Absorptionsschicht existiert ebenfalls eine Vielzahl unterschiedlicher Herstellungsprozesse. Die am weitesten verbreiteten Herstellungsprozesse können nicht jedes Absorbermaterial herstellen, aber meist eine große Bandbreite an Materialverbindungen einer Klasse (CIS, CIGSe, oder CISe). Zu nennen sind an dieser Stelle beispielsweise Co-Evaporation, verschiedene sequenzielle Prozesse, Selenisierung und Molekularstrahlepitaxie.

Da CIGSe-Absorber in der Familie der auf Kupferchalkopyrite basierenden Solarzellen derzeit die höchsten Wirkungsgrade erreichen und die am weitesten verbreitete Technologie darstellen, soll diese Zellenart für die weitere Beschreibung zugrunde gelegt werden.

Während der Deposition der Absorptionsschicht bildet sich auf der Molybdänoberfläche ein $MoSe_2$-Film aus. Dieser entspricht einem p-dotierten Schichthalbleiter mit einer Bandlücke von 1,3 eV. Da diese Schicht eine höhere Bandlücke als die typische CIGSe-Absorptionsschicht besitzt, fungiert sie als BSF mit geringer Rekombinationswahrscheinlichkeit für die in der Absorptionsschicht photogenerierten Elektronen und gleichzeitig als niedrigohmscher Kontakt zwischen CIGSe und Molybdän für die in der Absorptionsschicht photogenerierten Löcher.

An die ein bis zwei Mikrometer dicke Absorptionsschicht schließt sich, ähnlich der CdTe-Technologie, eine circa 50 nm dicke CdS-Schicht als Gegenspieler der p-dotierten Absorptionslage zur Bildung eines pn-Übergang an. Gleichwohl besitzt die CdS-Schicht weitere Aufgaben, wie: [Rau und Schock 2012, S. 333]

- eine Oberflächenpassivierung,
- Schutz der CIGSe-Schicht vor Schäden und chemischen Reaktionen während der Deposition der darauf folgenden ZnO-Schicht (TCO),
- Entfernung elementaren Selens auf der Absorberoberfläche durch Bildung von CdSe.

Derzeit ist die Substitution der CdS-Schicht durch andere Materialien Gegenstand der Forschung. Als mögliche Kandidaten gelten ZnSe, Zn(S,O,OH), $ZnIn_2Se_4$, In_2S_3 und $In_x(OH,S)_y$. Neben einer Verringerung des Wirkungsgrades macht der Einsatz dieser Materialien obendrein zusätzliche Vorkehrungen und veränderte Produktionsprozesse während ihrer Deposition notwendig.

Den Frontkontakt (TCO) bildet eine hochdotierte ZnO-Schicht. Je nach Produktionsprozess wird das Zinkoxid dazu mittels Aluminium oder Gallium (gesputterte Schicht), beziehungsweise Bor (MOCVD) dotiert. Zwischen die stark dotierte ZnO-Schicht und die CdS-Schicht wird eine 50 bis 100 nm dicke intrinsische ZnO-Lage eingebracht, um möglichen lokalen Defekten und lokalen Unregelmäßigkeiten entgegenzuwirken und so Wirkungsgradeinbußen zu vermeiden. [Klenk und Lux-Steiner 2006, S. 245] Für weiterführende Informationen bezüglich der CdS-, der intrinsischen und der dotierten ZnO-Schichten, sowie für mögliche cadmiumfreie Substitute wird an dieser Stelle auf [Naghavi *et al.* 2010] und [Rau und Schmidt 2001] verwiesen.

Der Wirkungsgradrekord für Dünnschichtlaborzellen auf Basis von Kupferchalkopyriten liegt derzeit bei 20,8 %. [NREL 2013] Dieses Zellenkonzept stammt vom Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZWE). Zellen auf Kupferchalkopyritbasis liefern damit zurzeit die besten Wirkungsgrade aller klassischen Dünnschichttechnologien. Kommerzielle Ableger dieser Zellentechnologie erreichen indessen Wirkungsgrade von knapp 13 %. [Mertens 2011, S. 132] Allerdings zeigen die Laborzellen unter Stressbedingungen[24] einen von der Verkapselung abhängigen Degradationseffekt. Dieser

[24] Dabei handelt es sich um eine Feucht-Wärme-Prüfung (engl.: damp heat test) mit folgenden Testbedingungen: 1000 Stunden in heißer (85 °C) und feuchter (85% Luftfeuchte) Umgebung

ist neben der Korrosion des Molybdänkontaktes besonders auf Veränderungen im Widerstand der intrinsischen ZnO-Schicht zurückzuführen. Wie Abbildung 3-32 zeigt, kann der auftretende Degradationseffekt jedoch durch Anpassungen in der Verkapselungstechnik des fertigen Moduls stark verringert werden.

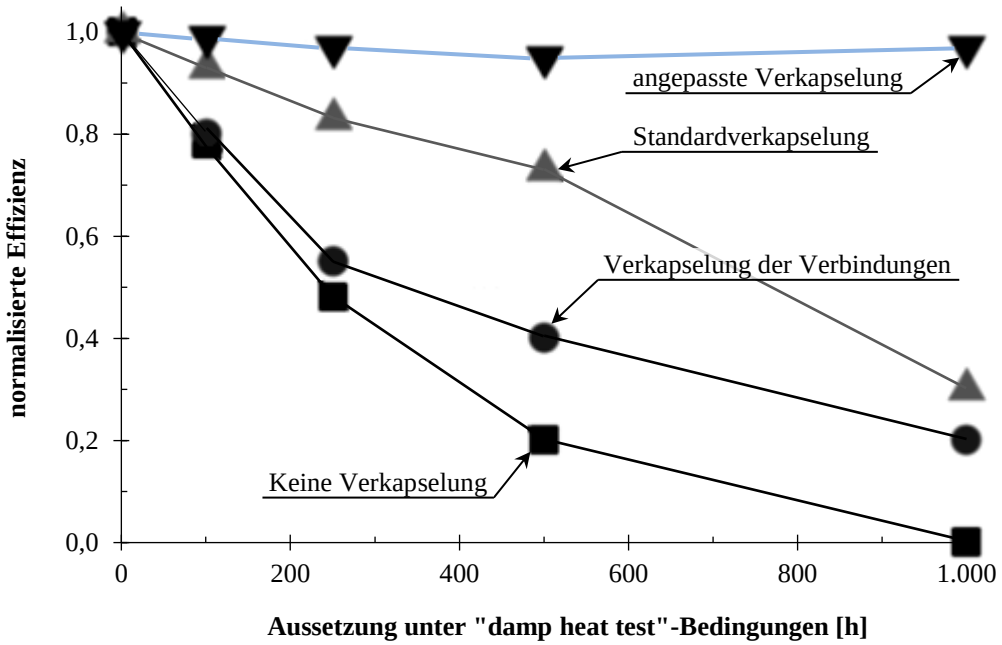


Abbildung 3-32: Degradationsverhalten von Modulen der CIGS-Gruppe mit verschiedenen Verkapselungstechniken. Abbildung nach [Powalla und Dimmler 2001].

Weiteres Augenmerk liegt auf der Entwicklung bifacialer- und Tandemzellen. Bei dem Konzept der bifacialen Zelle wird der opake Rückkontakt durch eine TCO-Schicht ersetzt. Bei Tandemzellen handelt es sich um den gleichen Ansatz wie bei a-Si:H / a-SiGe:H Tandemzellen, wo eine weitere Zelle mit einer höheren Bandlücke auf die bereits bestehende Struktur aufgebracht wird.

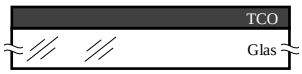
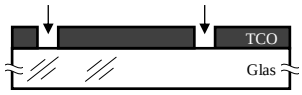
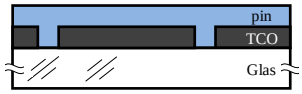
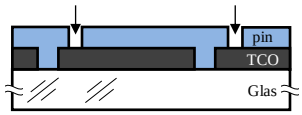
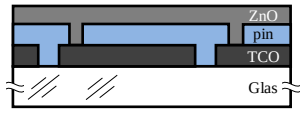
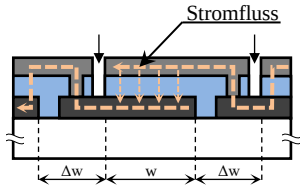
3.4.5 Serienverschaltung

Ein genereller Vorteil der Dünnschichttechnologien ist die Möglichkeit einer integrierten Serienverschaltung. Während kristalline Siliziumsolarzellen nach deren Einzelproduktion über Kontaktierung der Stromsammelschienen mittels eines verzinnten Kupferstreifens in Reihe geschalten werden[25], können Dünnschichtzellen derweil im

[25] Die Serienverschaltung bei kristallinen Siliziumzellen stellt einen der Herstellung der Einzelzellen nachgeschalteten und von deren Produktion vollkommen losgelösten Prozessschritt dar.

Produktionsprozess zu einem Modul verschaltet werden. Jedoch kann eine monolithische Serienverschaltung nur erfolgen, wenn die Dünnschichtzelle auf einem elektrischen Isolator wie einem Polymer oder Glas aufgebracht wird. Die sich aus den dafür notwendigen Produktionsschritten ergebende Funktionsweise der Verschaltung soll die folgende Tabelle 3-10 für eine Superstratekonfiguration auf einem Glassuperstrate am Beispiel einer a-Si:H-Zelle verdeutlichen[26].

Tabelle 3-10: Prozessschritte der integrierten Serienverschaltung einer pin-Zelle in Superstratekonfiguration.

		Prozessschritt	**Darstellung**	**Weitere Beschreibung**
Prozessreihenfolge	**1.**	Aufbringen des TCO		Deposition des Front-TCO auf dem Glassuperstrate (ITO)
	2.	Strukturierung TCO		Strukturierung des Frontkontaktes in regelmäßige Abstände durch einen Laserstrahl oder mechanisches Abkratzen.
	3.	Deposition pin-Struktur		Deposition der Halbleiterschichten in pin-Struktur (Tandemzellen als pin-pin-Struktur).
	4.	Zellenstrukturierung		Strukturierung der Halbleiterschichten ebenfalls mittels Laser und in gleichen Abständen wie beim Frontkontakt, aber seitlich versetzt.
	5.	Deposition Rückkontakt		Deposition des Rückkontaktes (ZnO). Dieser muss über die Zwischenräume der Halbleiterschichten mit dem Frontkontakt verbunden sein.
	6.	Strukturierung Rückkontakt		Strukturierung des Rückkontaktes mit den gleichen Abständen wie bei Schritt zwei und vier, ebenfalls leicht seitlich versetzt.

[26] Für Substratetechnologien sind die Verfahrensschritte analog. [Mertens 2011, S. 225] Zu beachten ist, dass dies ebenfalls nur für isolierende Substrate gilt.

Durch die Strukturierung der einzelnen Lagen wird der Frontkontakt eines Zellenabschnittes mit dem Rückkontakt des darauf folgenden Abschnittes verbunden. Der letzte Strukturierungsschritt (Nummer 6 der Tabelle 3-10) verhindert indes einen Kurzschluss der einzelnen Zellenabschnitte über den Rückkontakt. Wenngleich für einen möglichst geringen Serienwiderstand eine Mindestbreite der Gräben zwischen den Halbleiterschichten erforderlich ist, hängt auch der Anteil der nicht für den photovoltaischen Effekt nutzbaren Fläche (Δw) davon ab. Dieser Anteil liegt je nach Technologie zwischen 5 und 10 % und erstreckt sich über die Summe der strukturierten Flächen. Somit ergibt sich eine für den photovoltaischen Effekt nutzbaren Fläche w durch die Subtraktion des Produktes aus Δw mal der Anzahl der Kontaktierungen von der Gesamtfläche. Folglich ist für einen möglichst hohen Modulwirkungsgrad Δw möglichst gering zu halten. Mit modernen Lasersystemen kann ein Δw von 0,2 mm erreicht werden. [Witte *et al.* 2010] Die integrierte Serienverschaltung führt zu einem sehr homogen wirkenden Streifenmuster.

Ein wesentlicher Nachteil des Verfahrens ist, dass die Abscheidung der Halbleiterschichten über die gesamte Modulfläche vollkommen homogen sein muss. Wie schon bei Tandem- und Tripelstrukturen intern, begrenzt der „schlechteste" Zellenabschnitt den Wirkungsgrad des Moduls (analog „current matching"). Dieser Nachteil sorgt für um circa 10 % reduzierte Modulwirkungsgrade im Vergleich zu den einzelnen Zellen[27].

Die Prozessschritte der integrierten Serienverschaltung für Dünnschichtzellen basierend auf Silizium (a-Si:H, µc-Si:H und deren Kombination) unterscheiden sich im Wesentlichen zu den anderen genannten Dünnschichtzellentechnologien (CdTe, Kupferchalkopyrite) in den verwendeten Halbleitermaterialien. Im Falle der CdTe-Technologie muss zwischen Schritt 3 und 4 ein Aktivierungsschritt (vgl. Kap. 3.4.3) erfolgen. Bei den Kupferchalkopyriten erfolgt die Deposition in umgekehrter Reihenfolge. Im ersten Schritt der Serienverschaltung wird der Rückkontakt (Molybdän) aufgebracht und im letzten Schritt das Frontkontaktgefüge (intrinsisches ZnO und dotiertes ZnO). Weiterer Unterschied der Serienverschaltung zwischen den Dünnschichtzellentechnologien liegt in der gewählten Zellenbreite, welche auf die jeweiligen technologiespezifischen Eigenschaften optimal angepasst wird. [Bonnet 2012, S. 304]

[27] Bei der kristallinen Siliziumtechnologie tritt dieser Verlust nicht in diesem Maße auf, da dort die produzierten Zellen nach einer Leistungsprüfung erst in Qualitätsklassen eingeteilt und später zu einem Modul (in Abhängigkeit der Leistungsklasse) zusammengefasst werden.

KAPITEL 4

PRODUKTION

Das Kapitel der Produktion setzt sich neben den eigentlichen Betrachtungen der einzelnen Fertigungsschritte eines Photovoltaikmoduls samt des notwendigen Material- und Energiebedarfs auch mit Produktionskennzahlen sowie dem aktuellen regionalen Anlagenistbestand auseinander. Dazu erfolgt in einem ersten Schritt ein kurzer Abriss der Historie der Photovoltaiktechnologie mit Blick auf die terrestrische Applikation vor der Jahrtausendwende. Anschließend wird der globale Markt nach dem Jahr 2000 mit Fokus auf dessen echte Teilmenge: dem europäischen Markt hin untersucht. Dabei können Treiber und Marktverschiebungen für die Diskussion aufgegriffen werden. Im nächsten Schritt erfolgt die Begrenzung auf den europäischen Markt samt der Entwicklungshistorie seit 2000, wobei bewusst der deutsche Markt herausgestellt und ins Verhältnis gesetzt wird. Vor der gezielten Betrachtung der regionalen Installationshistorie werden die Besonderheiten des deutschen Marktes andiskutiert, um eine Grundlage für die regionale Entwicklung ab dem Jahr 2000 zu legen. Darauf aufbauend erfolgt eine Eingrenzung auf Sachsen samt der deutschseitigen, tschechischen und polnischen Anrainer. Der Fokus in

diesem Schritt bleibt dabei jedoch deutlich auf dem regionalen Bezugspunkt Sachsen erhalten. Dies dient der Eruierung des regionalen Istbestandes aus gesamttechnologischer Sicht. Anschließend wird der weitere Betrachtungsrahmen auf Basis der Ergebnisse eingegrenzt, um einen klar definierten Diskussionsrahmen für die technologische Betrachtung der Produktion aller Modulbestandteile zu schaffen. Die Beschreibung der Produktionsschritte aller Modulbestandteile umfasst alle Prozessschritte beginnend bei der initialen carbothermischen Reduktion von Siliziumdioxid bis hin zur Modulprozessierung. Dabei werden gezielt die jeweils benötigten Material- und Energieströme bilanziert, um letztendlich die Wechselwirkungen einer reinen Modulneuproduktion zu analysieren und produktionsabhängige Kennzahlen zu ermitteln. Weiter werden alle diskussionsrelevanten und direkt zur Produktion verwendeten Materialien als auch die benötigten Hilfsstoffe auf ihre ökologische und ökonomische Kritikalität hin untersucht. Ziel ist die Konstituierung einer Vergleichsgrundlage zwischen einer reinen Modulneuproduktion und den sich im Kapitel des Recyclings anschließenden Betrachtungen sowie die Bildung einer sich aus den marktbezogenen Diskussionen ergebenden statistischen Grundlage für die Prognose möglicher zukünftiger Abfallströme – auch in definierten regionalen Grenzen.

Kapitelfeingliederung

4.1 Geschichte der Photovoltaik 153
4.1.1 Allgemeine historische Daten 153
4.1.2 Terrestrische Applikation 154

4.2 Märkte für Photovoltaik 157
4.2.1 Globale Betrachtungen 157
4.2.2 Europäische Erhebungen 163
4.2.3 Besonderheiten des deutschen Marktes 168
4.2.4 Regionale Entwicklungen 176
4.2.5 Zusammenfassung der Marktentwicklung 192

4.3 Anteile der Technologien 194

4.4 Abgrenzung des weiteren Untersuchungsrahmens 201

4.5 Vom Siliziumdioxid zum kristallinen Standardsiliziumsolarmodul 206
4.5.1 Vorbetrachtungen 206
4.5.1.1 Modulbestandteile und Konzeption 206
4.5.1.2 Allgemeine stoffliche Zusammensetzung Standardmodul 211
4.5.2 Siliziumaufreinigung und Ingotherstellung 216
4.5.2.1 Theoretische Grundlagen der Siliziumraffiniation 216
4.5.2.1.1 Carbothermische Reduktion – MGS-Qualität 216
4.5.2.1.2 Trichlorsilan und Siemensverfahren – EGS-Qualität 218
4.5.2.1.3 Weitere Verfahren – SGS- und UMG-Qualität 223
4.5.2.2 Grundlagen der Ingotherstellung 226
4.5.2.2.1 Monokristallines Silizium 226
4.5.2.2.2 Multikristallines Silizium 229
4.5.2.3 Stoffliche und energetische Betrachtungen zur Siliziumaufreinigung und Ingotherstellung 234
4.5.2.3.1 Siliziumaufreinigung 234
4.5.2.3.2 Ingotherstellung 238
4.5.2.3.3 CZ-Verfahren 240
4.5.2.3.4 Kokillengussverfahren 241
4.5.3 Waferfertigung 242
4.5.3.1 Theoretische Grundlagen 242
4.5.3.1.1 Ingotpräparation 242
4.5.3.1.2 Vereinzelung zu Wafern 244
4.5.3.2 Stoffliche und energetische Betrachtungen 249

4.5.4 Produktion kristalliner Siliziumsolarzellen 251
4.5.4.1 Theoretische Grundlagen 251
4.5.4.2 Stoffliche und energetische Betrachtungen 268
4.5.5 Fertigung Standardsolarmodul 271
4.5.5.1 Theoretische Grundlagen 272
4.5.5.2 Stoffliche und energetische Betrachtungen 278
4.5.6 Zusammenfassende Betrachtungen zur Produktion von Standardsolarmodulen auf Basis der kristallinen Siliziumsolartechnologie 280
4.5.6.1 Stoffliche Zusammensetzung des definierten Standardsolarmoduls 287
4.5.6.2 Weitere Beziehungen zwischen der Produktion und der stofflichen Zusammensetzung eines Standardsolarmoduls 296
4.6 Kritische Rohstoffe 301
4.6.1 Umwelteffekte und Gesundheitsgefährdungspotenziale 301
4.6.2 Verfügbarkeit und Importabhängigkeit 305
4.7 Übersicht Produzenten 311

4.1 Geschichte der Photovoltaik

Der Ursprung der Photovoltaiktechnologie liegt im Jahr 1839, als Alexandre Edmond Becquerel[28] bei elektrochemischen Experimenten den äußeren Photoeffekt entdeckte. 34 Jahre später beobachteten die beiden Herren Willoughby Smith und Joseph May den für die Photovoltaik wichtigen inneren Photoeffekt. Sie stellten fest, dass das Halbleitermaterial Selen unter Lichteinwirkung seinen Widerstand ändert. Kurz darauf konstatierten die Engländer William G. Adams und Richard E. Day die direkte Wandlung elektromagnetischer Strahlung in elektrische Energie mittels eines mit Platinelektroden versetzten Selenstabes. 1883 entwickelte der Amerikaner Charles E. Fritts eine erste Solarzelle aus Selen mit einer dünnen Goldelektrode. Die Zelle besaß einen Wirkungsgrad von weniger als 1 %. Da zu dieser Zeit die Quantenphysik noch nicht bekannt war, wurde seine Erfindung sehr skeptisch betrachtet. Zur Verifizierung sendete er ein Probestück an Herrn Werner Siemens[29] nach Deutschland, der die Entdeckung vor der Königlichen Akademie von Preußen bestätigte.

4.1.1 Allgemeine historische Daten

In den darauf folgenden 70 Jahren stieg das Verständnis der physikalischen Vorgänge während des Photoeffektes. Einen großen Teil dazu trug die Beschreibung der Lichtquantentheorie durch Albert Einstein bei. 1950 lieferte William B. Shockley[30] die theoretische Basis für heutige Photovoltaikzellen mit der Erläuterung der Funktionsweise des pn-Übergangs. 1954 wurde in der Bell-Zelle erstmals der photovoltaische Effekt durch die Kombination des inneren Photoeffekts mit einem pn-Übergang genutzt [Chapin *et al.* 1954]. Die Zelle besaß einen Wirkungsgrad von 6 % (vgl. Kapitel 3.3.5: Betrachtungen zum Wirkungsgrad kristalliner Siliziumsolarzellen). Trotz der Steigerung des Wirkungsgrades der Solarzellentechnologie in den folgenden Jahren auf über 10 % blieb diese ob ihrer hohen Herstellungskosten vorerst nur Spezialanwendungen vorbehalten. Dazu zählte zu Beginn vor allem die Raumfahrt. Während des ersten konkreten Einsatzes der Photovoltaiktechnologie in der Raumfahrt beim amerikanischen

[28] Vater von Antoine Henri Becquerel: Namensgeber der Einheit für die Aktivität radioaktiver Stoffe.

[29] War zu seiner Zeit einer der angesehensten Experten auf dem Gebiet der Elektrizität.

[30] Amerikanischer Nobelpreisträger und Miterfinder des Transistors.

Satellit Vanguard 1 im März 1958 zeigten sich die Vorteile eines solchen leichtgewichtigen und wartungsarmen Energieversorgungssystems. Aufgrund des Erfolgs der Vanguard 1 Mission setzte sich die Photovoltaik zunehmend als Standardenergiequelle für Satelliten durch. Auch heute wird die elektrische Versorgung von Satelliten noch mittels photovoltaischer Systeme sichergestellt. Dabei kommen partiell modernste Hochleistungstripelzellen mit Wirkungsgraden über 27,5 % zum Einsatz. [Mertens 2011, S. 32ff] Ein Vergleich der Raumsonden Vanguard 1 (erster Einsatz der Photovoltaiktechnologie in der Raumfahrt) und der Raumsonde Rosetta (Start 2004) mit Fokus auf die Integration der Solarmodule und deren technischen Relevanz zeigt die enorme Bedeutung in der Raumfahrt. Während Vanguard 1 noch mit sechs Solarzellen zur Erzeugung von 5 mW ausgestattet war, besitzt die Raumsonde Rosetta schon Solarzellen mit einer Gesamtfläche von 64 Quadratmetern[31].

4.1.2 Terrestrische Applikation

Wenngleich die Photovoltaik in der Raumfahrt schon früh ihren Durchbruch erlebte und durch selbige in den 1960er Jahren weiterentwickelt wurde, beschränkte sich ihre terrestrische Anwendung allenfalls auf Ausnahmefälle wie die Installation von Inselanlagen für Signalsysteme, Berghüten et cetera, die vom nächsten Energieverbundnetz sehr weit entfern lagen. Erst mit dem arabischen Ölembargo von 1973 stieg das politische und ökonomische Interesse an der terrestrischen Nutzung der Technologie [Fraas und Partain 2010, S. 4]. Gleichwohl bedeutete das Jahr 1973 mit der Entwicklung der „Violet-Cell“ auch einen technologischen Sprung für die Photovoltaik. Durch die Nutzung von Light Trapping in der Solarzellentechnologie und der damit einhergehenden Entwicklung der „chemically textured non-reflecting black cell“ im Jahr 1975 erfuhr die Photovoltaik einen weiteren entscheidenden technologischen Schub. Die technischen Neuerungen der beiden Zellenkonzepte, wie:

- eine Antireflexionsbeschichtung,
- das Back Surface Field,
- das Front Surface Field,
- ein dünner n^+-Emitter,

[31] Liefern 440 W Gesamtleistung bei -130 °C und 1/20 der Strahlungsintensität auf der Erde (Bedingungen bei ~ 5 AE).

- schmale Frontkontakte,
- die Passivierung der Zellenoberfläche und
- die Texturierung der Zellenoberseite.

führten zu Rekordwirkungsgraden von 17,2 % bei kristallinen Siliziumlaborzellen und stellen die Basis der heute mittels des Siebdruckverfahrens produzierten Standard-siliziumzellen dar.[32]

In den folgenden Jahren stieg das Vertrauen in die Photovoltaiktechnologie mit ihrer konkreten Anwendung, wie beispielsweise:

- der Umrüstung und dem Betrieb des gesamten Telekommunikationsnetzes des australischen Hinterlandes mit photovoltaikgestützten Batterieanlagen im Jahr 1976,
- der Verwendung von Solarmodulen in Kombination mit Akkumulatoren im Golf von Mexiko seit den frühen 1980ern zum Betrieb von Signalanlagen kleiner Ölbohrinseln und
- der Umrüstung von Navigationslichtern und Signalsystemen auf photovoltaische Systeme durch die amerikanische Küstenwache.

Mitte der 1970er übertraf die Produktion von Solarzellen für terrestrische Anwendungen erstmals die raumfahrtbezogene Produktion, obschon die Technologie weiterhin vordergründig für Inselanlagen genutzt wurde. Zusätzlichen Auftrieb erhielt die Technologie durch das Ziel der Entwicklung eines Solarmoduls als kostengünstiges Standardprodukt im Jahre 1977 durch die Sandia Laboratories, New Mexico, USA. Auf Grund von Begebenheiten wie dem atomaren Störfall im März 1979 in Harrisburg, der Ölkrise 1979 und der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl 1986 wuchs die Bedeutung der Photovoltaik auch für die Politik. Derweilen durchbrach die Solarforschung 1985 mit dem Konzept der Buried-Contact-Zelle die 20 % Wirkungsgradgrenze.

Mit dem technischen Fortschritt der Photovoltaik und ersten Erkenntnissen bezüglich der Zuverlässigkeit aus den konkreten terrestrischen Anwendungsbeispielen stieg auch das politische und ökonomische Interesse. Seit Ende der 1980er Jahre forcierten besonders Deutschland, Japan und die USA Forschungsförderungsprogramme im Bereich der Photovoltaiktechnologie. Gleichwohl entstanden in den 1990ern erste Förderprogramme,

[32] Die Integration eines Front-Surface-Fields findet derzeit nur teilweise Anwendung in der Solarzellenproduktion.

die die Nutzung von netzgekoppelten Photovoltaikmodulen auf Einfamilienhäusern innervieren sollten. Dazu zählen beispielsweise:

- das 1.000-Dächer-Programm in Deutschland ab 1990,
- das 70.000-Dächer-Programm in Japan ab 1994,
- das 1.000.000-Dächer-Programm in den USA ab 1997 sowie
- das 100.000-Dächer-Programm (nach Auslaufen des 1000-Dächer-Programms) in Deutschland ab 1999.

Die dadurch beflügelte Nachfrage (privat und gewerblich) nach der Photovoltaiktechnologie stieß auch das industrielle Engagement an. So wurde 1997 bereits eine weltweite Produktionskapazität von 100 MW_p je Jahr realisiert [Hegedus und Luque 2003, S. 12]. Ein weiterer Meilenstein der Photovoltaikhistorie stellt die im Jahre 1999 erreichte global installierte Gesamtleistung von 1 GW_p dar.

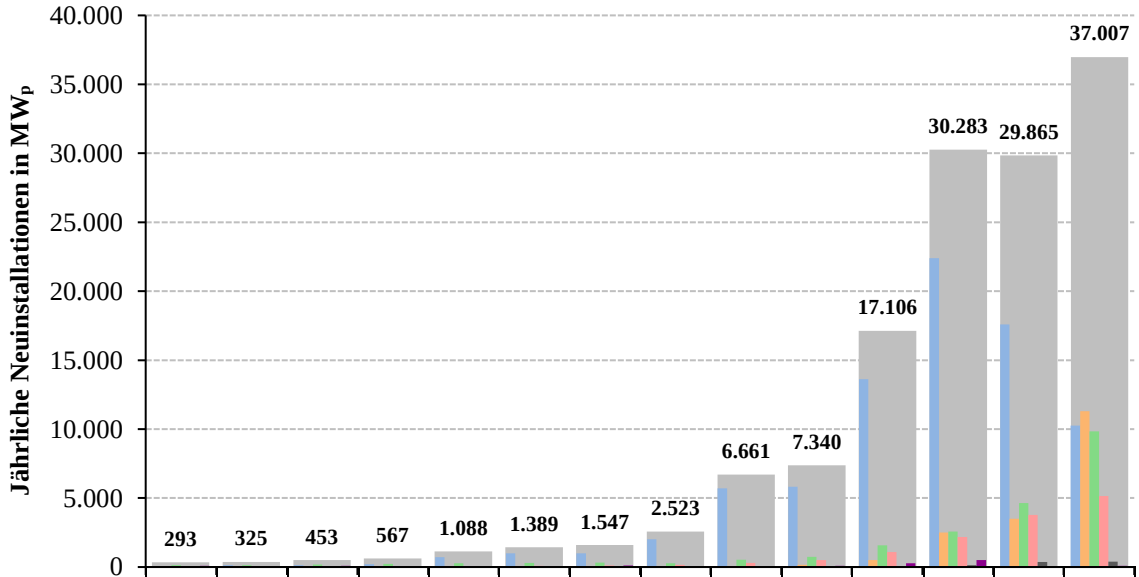
Beginnend mit dem Jahr 2000 erfuhr die Photovoltaik einen, wenn auch national und international stark divergierenden, Wachstumsschub in allen Bereichen. Das Aufblühen der Märkte verlief in den folgenden Jahren räumlich stark unterschiedlich, weshalb in den nachstehenden Kapiteln der Fokus auf der historischen Marktentwicklung ab dem Jahr 2000 liegen soll.

4.2 Märkte für Photovoltaik

Mit Hilfe eines Top-Down-Ansatzes erfolgt eine Unterteilung in globale Betrachtungen, europäische Erhebungen, gefolgt von den Besonderheiten des deutschen Marktes und schließlich regionalen Entwicklungen. Speziell auf der nationalen Betrachtungsebene wird dann verstärkt auf Förderprogramme und Vergütungsmodelle eingegangen.

4.2.1 Globale Betrachtungen

Im Jahr 2012 wuchs die global installierte Photovoltaikkapazität um rund 29,9 GW_p. Damit sank der globale Markt für Kapazitätsneuzubau erstmals unter das Niveau vom Vorjahr (2011 rund 30,2 GW_p Zubau). Bis 2011 war ein stetiges Gesamtmarktwachstum, wenn auch mit stark unterschiedlichen Ausprägungen, zu verzeichnen. Wenngleich sich dieser Trend mit dem Jahr 2013 wieder fortzusetzen scheint, änderte sich seit 2012 der Grund dafür.



	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Europa	58	133	134	202	705	985	997	2.023	5.708	5.833	13.616	22.407	17.580	10.253
China	19	5	19	10	10	8	10	20	40	160	500	2.500	3.500	11.300
Asien-Pazifik	126	128	190	230	282	304	325	271	530	745	1.578	2.562	4.646	9.833
Amerika	2	3	30	48	61	82	110	166	306	500	1.082	2.181	3.774	5.153
MO & Afrika	n/a	n/a	n/a	n/a	1	0	0	1	1	22	46	125	365	383
Rest der Welt	88	56	80	77	29	10	105	42	76	80	284	508	-	85

Abbildung 4-1: Globale Neuinstallationen von 2000 bis 2013 in MW_p nach [EPIA 2014]. / **MO:** Mittlerer Osten.

2012 sanken zum ersten Mal seit der Jahrtausendwende die jährlichen Neuinstallationen in Europa unter das Niveau vom Vorjahr (von 22,4 GW_p im Jahr 2011 auf 17,6 GW_p im Jahr 2012). Der globale Gesamtmarkt kompensierte die europäische Minderungsrate mit wachsenden Märkten außerhalb Europas und stabilisierte sich vorerst auf dem Niveau von 2011. Hatte der europäische Markt 2011 bei den jährlich neuinstallierten Kapazitäten noch einen Gesamtmarktanteil von knapp 74 %, schrumpfte dieser im Jahr 2012 auf rund 58,9 % und im Jahr 2013 auf 27,7 %. Dieses Verhalten beschreibt einen Wandel des Gesamtmarktes, welcher sich in den kommenden Jahren verstärkt auswirken wird. Abbildung 4-2 verdeutlicht diese Verschiebung durch die Gegenüberstellung räumlich geclusterter Gesamtmarktanteile (Märkte mit > 1 GW_p Neuinstallationen) für die Jahre 2011, 2012 und 2013. Die angegebenen prozentualen Angaben sind nach den Daten der Abbildung 4-1 berechnet, welche die absoluten jährlichen Kapazitätszuwächse nach der gleichen räumlichen Clusterung wiedergibt.

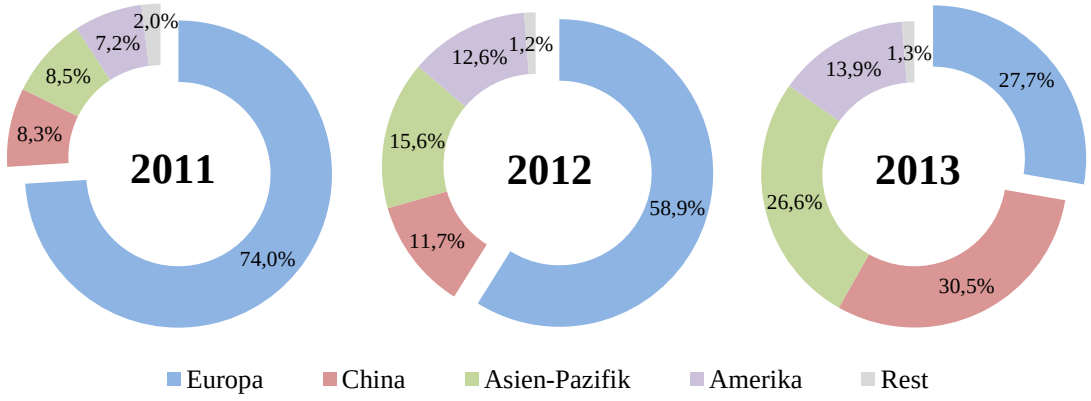


Abbildung 4-2: Vergleich der Gesamtmarktanteile 2011 bis 2013 in %.

Von 2007 bis 2010 hatte der europäische Markt noch einen Gesamtanteil von jeweils mehr als 79 % und beeinflusste so den globalen Markt für Kapazitätszubau enorm. 2013, nach zwei Jahren der europäischen Marktschrumpfung, ist erstmals China der größte Markt im Bereich des Photovoltaikneuzubaus. Wenngleich der Gesamtmarkt 2013 einen neuen Rekordwert mit 37 GW_p Neuzubau erreichte, fiel der europäische Markt auf ein Niveau unter das des Jahres 2010. Derweilen stellte der chinesische Markt eine auf nationaler und globaler Ebene historische Bestmarke mit 11,3 GW_p Neuinstallationen auf. Die folgende Tabelle 4-1 zeigt zum Vergleich die zehn bis dato höchsten jährlichen Kapazitätszuwächse geordnet nach der Höhe der neuinstallierten Kapazitäten inklusive des entsprechenden Bezugsjahres auf.

Tabelle 4-1: Die 10 globalen Zubaurekorde bis 2013 nach [IEA 2013].

	China	Italien	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Italien	China	USA	Spanien	China
Jahr	2013	2011	2012	2011	2010	2009	2012	2012	2012	2008	2011
Kap. [MW_p]	11.300	9.305	7.604	7.485	7.413	3.806	3.647	3.500	3.362	2.896	2.500

Mit Blick auf den globalen Gesamtmarkt für Kapazitätszubau konnten die stark wachsenden Märkte in China, des Asien-Pazifikraums und Amerika den europäischen Marktverlust 2013 nicht nur kompensieren, sondern führten darüber hinaus wieder zu einem Gesamtmarktwachstum. Während der chinesische Markt und der Markt des Asien-Pazifikraums zusammen von 2012 zu 2013 um rund 170 % wuchsen, schrumpfte der europäische Markt um 40 %.

Stärker differenziert betrachtet, sprich auf nationale Märkte bezogen, ergibt sich gerade bezüglich der Jahre 2012 und 2013 ein ähnliches Bild. Die nachstehende Tabelle 4-2 zeigt die 10 größten Märkte (national) für Kapazitätszubau der Jahre 2010 bis 2013 im Vergleich.

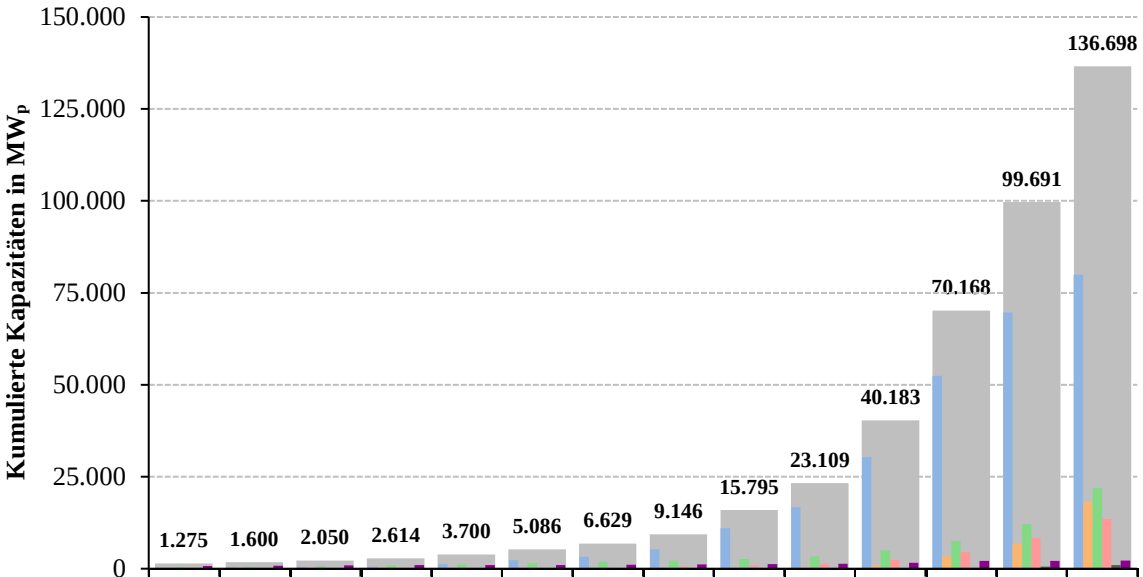
Tabelle 4-2: Die 10 größten Märkte des jährlichen Kapazitätszubaus von 2010 bis 2013 im globalen Vergleich mit Daten nach [IEA 2013], Ländercode nach ISO 3166 Alpha-3 code.

		Top 10										
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**Eintritts-barriere**
Jahr	**2010**	DEU	ITA	CZE	JPN	USA	FRA	CHN	BEL	ESP	AUS	383 MW_p
	2011	ITA	DEU	CHN	USA	FRA	JPN	BEL	GBR	AUS	GRC	425 MW_p
	2012	DEU	ITA	CHN	USA	JPN	FRA	AUS	IND	GBR	GRC	912 MW_p
	2013	CHN	JPN	USA	DEU	ITA	IND	ROU	GRC	GBR	AUS	848 MW_p

In den Jahren 2010 bis 2012 dominierten die nationalen Märkte von Deutschland (Gesamtmarktanteil 2012: ~ 26 %) und Italien (Gesamtmarktanteil 2012: ~ 13 %) den globalen Markt. Im Gegensatz dazu sind im Jahr 2013 die drei größten Märkte außereuropäisch. China konnte von 2012 zu 2013 seinen Gesamtmarktanteil von 12 % auf 30,5 % steigern und die Marktführerschafft übernehmen. Auch Japan (2012: 6 % → 2013: 18,6 %) und die USA (2012: 11 % → 2013: 13 %) konnten 2013 an Deutschland (2012: 26 % → 2013: 8,9 %) vorbeiziehen und trugen so zur Marktverschiebung bei.

Der Vergleich der Tabelle 4-1 mit der Tabelle 4-2 zeigt, dass trotz gestiegenem Rekordzubau im Jahr 2013 die Eintrittsbarriere in die globalen top 10 Märkte gesunken ist. Obschon eines globalen Rekordzubaus sinken 2013 vor allem die großen europäischen Märkte. Weiter zeigt sich eine Konzentration des Globalmarktes auf die großen nationalen Märkte; die fünf größten Märkte (China, Japan, USA, Deutschland und Italien) haben 2013 zusammen einen Gesamtmarktanteil von mehr als 75 %.

Ein anderes Bild ergibt sich bei der Betrachtung der global kumulierten Kapazitäten. Durch die europäische Marktführerschaft bei den jährlich neuinstallierten Kapazitäten bis einschließlich 2012 sind 2013 noch rund 58,8 % der globalen Kapazität in Europa installiert, wie auch nachstehender Abbildung 4-3 entnommen werden kann.



	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Europa	116	249	381	580	1.283	2.264	3.258	5.274	10.970	16.777	30.352	52.462	69.699	79.952
China	19	24	42	52	62	70	80	100	140	300	800	3.300	6.800	18.100
Asien-Pazifik	368	496	686	916	1.198	1.502	1.827	2.098	2.628	3.373	4.951	7.513	12.159	21.992
Amerika	21	24	54	102	163	246	355	522	828	1.328	2.410	4.590	8.365	13.518
MO & Afrika	n/a	n/a	n/a	n/a	1	1	1	2	3	25	80	205	570	953
Rest der Welt	751	807	887	964	993	1.003	1.108	1.150	1.226	1.306	1.590	2.098	2.098	2.183

Abbildung 4-3: Globale kumulierte Kapazitäten von 2000 bis 2013 in MW_p nach [EPIA 2014]. / **MO:** Mittlerer Osten.

Sollte der Trend bei den jährlichen Neuinstallationen anhalten, wird die Führungsrolle Europas auch bei den kumulierten Kapazitäten in absehbarer Zukunft schwinden. Waren 2012 global nur rund 30 GW_p außerhalb Europas installiert, sind es 2013 schon rund 57 GW_p. Dieser außereuropäische Wachstumstrend wird mit zunehmenden Markteintritt von Ländern im Sonnengürtel auch in den nächsten Jahren für stark wachsende globale

Kapazitäten sorgen. Trotz des schwächelnden europäischen Marktes stieg die kumulierte globale Kapazität im Jahr 2013 um 37,1 % an. Zum Vergleich: 2012 waren es noch 42,1 %. In den Jahren 2010 und 2011, als der europäische Markt noch Wachstumsraten bei den jährlichen Neuinstallationen bezogen auf das jeweilige Vorjahr aufwies, stiegen die kumulierten globalen Kapazitäten beide Mal um rund 74 %.

Während 2013 neun der zehn Topmärkte beim Kapazitätszubau mindestens 1 GW_p installierten (vgl. Tabelle 4-2, Seite 159 exklusive Australien) verfügen nun bereits 17 Nationen über eine kumulierte Kapazität von mindestens 1 GW_p. Die folgende Tabelle 4-3 zeigt diese Länder geordnet nach ihren jeweiligen kumulierten Gesamtkapazitäten.

Tabelle 4-3: Nationen mit kumulierter Kapazität von mindestens 1 GW_p. Stand 2013 nach [IEA 2014].

	Deutschland	**China**	**Italien**	**Japan**	**USA**	**Spanien**	**Frankreich**	**Australien**	**Belgien**	**Großbritannien**	**Griechenland**	**Indien**	**Tschechien**	**Korea**	**Kanada**	**Rumänien**	**Bulgarien**
Kap. [GW_p]	35,5	18,3	17,6	13,6	12,0	5,6	4,6	3,3	3,0	2,9	2,6	2,3	2,2	1,5	1,2	1,2	1,0

Mit einem Neuzubau von 11,3 GW_p im Jahr 2013 stieg die installiere Gesamtkapazität Chinas innerhalb eines Jahres um fast ein drittel der kumulierten Kapazitäten des Spitzenreiters Deutschland.

Anfang 2013 durchbrach die global kumulierte Kapazität die 100 GW-Marke. Zum Vergleich: 1999 waren 1 GW_p und 2010 10 GW_p global installiert. Brauchte es zur Verzehnfachung der installierten Kapazitäten von 1 GW_p auf 10 GW_p noch rund 11 Jahre, dauerte die zweite Verzehnfachung nur knapp 3 Jahre. Mit dem rasanten Wachstum der installierten Kapazitäten blieb die Photovoltaik hinter Wasser- und Windkraft auch 2012 und 2013 weiterhin die drittwichtigste erneuerbare Energiequelle bezogen auf die global kumulierten Kapazitäten [EPIA 2014, S. 4].

[Masson *et al.* 2013] geht sowohl im Business-as-Usual, als auch im politikgetriebenem Szenario von weiter wachsenden globalen Märkten aus. So wird in beiden Szenarien spätestens Anfang 2015 eine global kumulierte Kapazität von mindestens 200 GW_p erwartet. Weiter wird davon ausgegangen, dass verstärkt die Märkte in China, Japan, Nord- und Südamerika sowie der Asien-Pazifikregion zu dem Gesamtmarktwachstum der Neuinstallationen in den folgenden Jahren beitragen. Die europäischen Marktanteile sollen dabei maximal bei rund 35 % und mindestens bei circa 26 % liegen. Dies ist bei der aktuellen Marktentwicklung (vgl. Abbildung 4-1, Seite 157) jedoch kritisch zu bewerten. Vielmehr kann von steigenden Marktanteilen der außereuropäischen Märkte ausgegangen werden, sodass sich an dieser Stelle Handlungsbedarf für Europa darbietet. Gestützt wird diese Hypothese zusätzlich durch [Hauff *et al.* 2010] und der darin begründeten Annahme des starken Wachstums von Märkten der Länder im Sonnengürtel. Die folgende Abbildung 4-4 zeigt eine zusammenfassende Übersicht des Berichts.

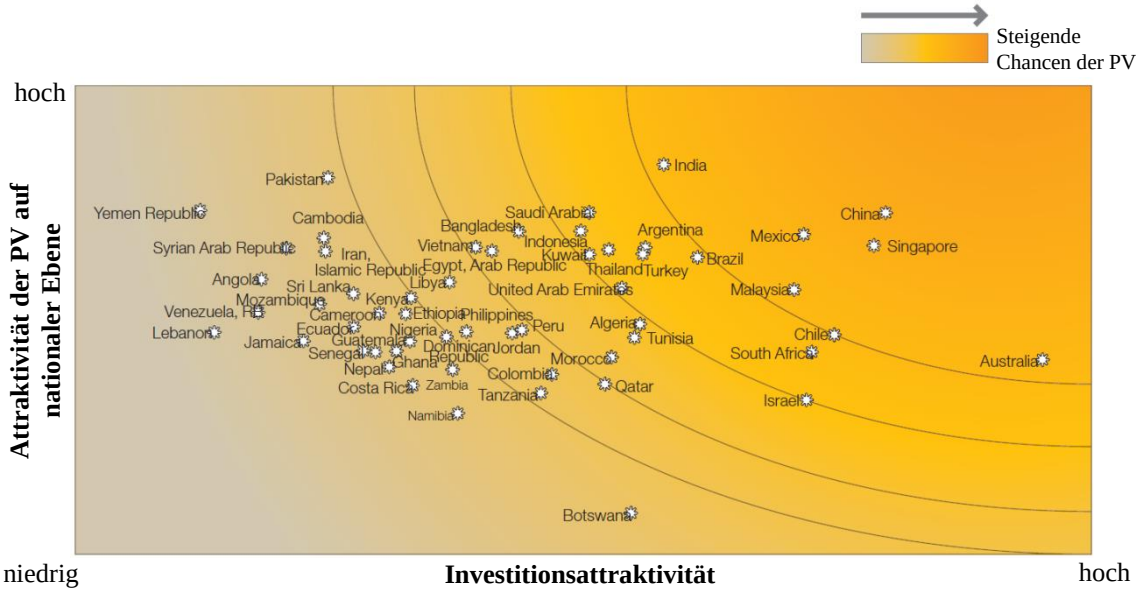


Abbildung 4-4: Chancen der Photovoltaik in den Staaten des Sonnengürtels. Abbildung nach [Hauff *et al.* 2010, S.11].

Die schon 2010 positiven Wachstumsprognosen für den chinesischen Markt bewahrheiteten sich bereits 2011 und unterstrichen mit dem Rekordwachstum von 2013 ihr Potenzial. Auch Australien, Indien und Israel wiesen in der Tat in den letzten Jahren ein Marktwachstum auf. Besonders für Mexiko, Indien und Chile sind die Prognosen für eine zukünftige schnelle Marktentwicklung positiv.

Da, wie bereits andiskutiert, die europäischen Märkte für Neuinstallationen in den letzten beiden Jahren ob innerlicher Fluktuationen schrumpften, soll nun im Folgenden vertieft auf diese eingegangen werden.

4.2.2 Europäische Erhebungen

Der gesamteuropäische Markt für neuinstallierte Kapazitäten unterlag rückblickend starken Fluktuationen. Dessen Evolution wurde besonders seit 2007 durch unregelmäßige Schwerpunktsverschiebungen von einem Land zum anderen getrieben. Deutschland etablierte sich zwar seit 1994 als eine konstante markttreibende Kraft und konnte so bei den europaweiten neuinstallierten Kapazitäten eine Vorreiterrolle in Punkto Stetigkeit einnehmen, wurde jedoch im beschriebenem Zeitraum zeitweilig von sprunghaften Kapazitätszuwächsen in unterschiedlichsten europäischen Staaten übertroffen.

Von 2000 bis 2003 hatte Deutschland am europäischen Markt neuinstallierter Kapazitäten einen Anteil von mindestens 70 %. In den folgenden drei Jahren wurde darüber hinaus ein Marktanteil von bis zu 95 % erzielt, wodurch Deutschland in diesem Segment seine Marktführung ausbauen konnte. Nach dem Boom des spanischen Marktes von 2007 bis 2008 brach selbiger anschließend fast vollends wieder ein. Wenngleich der deutsche Marktanteil während dessen, ob des punktuell formidablen spanischen Neuzubaus, auf 34 % schrumpfte, stiegen die absoluten Neuinstallationen in Deutschland weiter an. Ein ähnliches Verhalten wie das des spanischen Marktes zeigte der tschechische Markt zwischen 2009 und 2010. Zeitgleich erlebte der deutsche Markt in beiden Jahren nahezu eine Verdopplung im Bereich der jährlich neuinstallierten Kapazitäten (Neuzubau 2008: ~ 2 GW_p, 2009: ~ 3,8 GW_p und 2010: ~ 7,4 GW_p). Seit 2010 tritt nun Italien neben Deutschland als zweite Stütze des europäischen Marktes auf. Nach der italienischen Rekordinstallation von 2011 (vgl. Tabelle 4-1 auf Seite 159) sieht sich dieser Markt aber auch rückläufigen Zahlen ausgesetzt. Von 9,3 GW_p Neuinstallationen in 2011 sank der italienische Markt auf rund 3,6 GW_p in 2012 hin zu circa 1,5 GW_p im Jahr 2013. Dessen ungeachtet stellte er bis Ende 2013 neben dem deutschen Markt die zweitgrößten europäischen Kapazitätszuwächse (vgl. Tabelle 4-2, Seite 159).

Nach den hohen Neuinstallationen in Italien von 2009 bis 2013 stellt sich der europäische Markt aktuell breiter gestreut auf. Länder wie Slowenien, die Niederlande, Österreich und Dänemark tragen teilweise seit 2012 einen wachsenden Anteil zum europäischen Markt bei.

Zwischen 2010 und 2012 stabilisierten sich die jährlichen Kapazitätszuwächse in Deutschland auf einem Niveau von rund 7,5 GW_p. So konnte der gesamteuropäische Markt für Kapazitätszubau bis 2011 ein stetiges, wenn auch mit unterschiedlichen

Ausprägungen behaftetes, Wachstum aufweisen. Mit dem Rückgang des italienischen Beitrags seit 2012 beginnt der gesamteuropäische Markt, wie bereits bei den globalen Betrachtungen beschrieben, wieder zu schrumpfen. Zwar stiegen 2012 die Neuinstallationen auf bis dato kleinen europäischen Märkten; diese konnten jedoch die italienische Marktschrumpfung nicht kompensieren.

2013 gingen die europaweiten Neuinstallationen in toto weiter zurück, da die aufstrebenden kleineren Märkte die weitere Schrumpfung des italienischen Marktes und den Rückgang der deutschen Neuinstallationen auf ein Niveau unter das von 2009 (2009: ~ 3,8 GW_p und 2013: ~ 3,3 GW_p) nicht neutralisieren konnten.

Kumuliert betrachtet ergibt sich ein ähnliches Bild. Die kumulierten Kapazitäten von Ländern wie Spanien und Tschechien stagnieren nach deren Boom bei den Neuinstallationen bis heute auf nahezu einem Niveau. Deutschland stellt auch bei den kumulierten Kapazitäten den höchsten Anteil, was aus der Betrachtung der jährlichen Neuinstallationen evident hervorgeht. 2013 besitzt Deutschland trotz rückläufiger Neuinstallationen immer noch einen Gesamtanteil der europäischen kumulierten Kapazitäten von knapp 45 %. Rekordanteile lagen zwischen 2005 und 2007 bei über 73 %, welche mit dem spanischen und tschechischen Boom sowie dem italienischen Rekordzubau von 2011 sprunghaft diskontinuierlich auf das heutige Niveau sanken.

Die auf der folgenden Seite dargestellte Abbildung 4-5 fasst neben dem Stand des europäischen Marktes von 2012 auch die bis dato kumulierten Kapazitäten kartographisch zusammen. Die Differenzen der gesamteuropäischen kumulierten und neuinstallierten Angaben zu den Werten aus der Abbildung 4-1 (S. 157) und Abbildung 4-3 (S. 160) ergeben sich neben statistischen Abweichungen aus dem absenten Einbezug von europäischen (geographisch) Ländern wie beispielsweise der Ukraine (2012: 373 MW_p kumulierte und 182 MW_p neuinstallierte Leistung) und der Schweiz (2012: 416 MW_p kumulierte und 200 MW_p neuinstallierte Leistung). Die Abbildung 4-5 zeigt lediglich die kumulierten Kapazitäten und Neuinstallationen von 2012 für die EU-27-Staaten. Neben den beiden bereits aufgeführten Staaten zählen laut [Masson *et al.* 2013, S. 18] die Türkei, Norwegen und Kroatien (seit 01.07.2013 Mitglied in bei den EU-28-Staaten in Folge der EU-Erweiterung) zu den weiteren europäischen Photovoltaikmärkten.

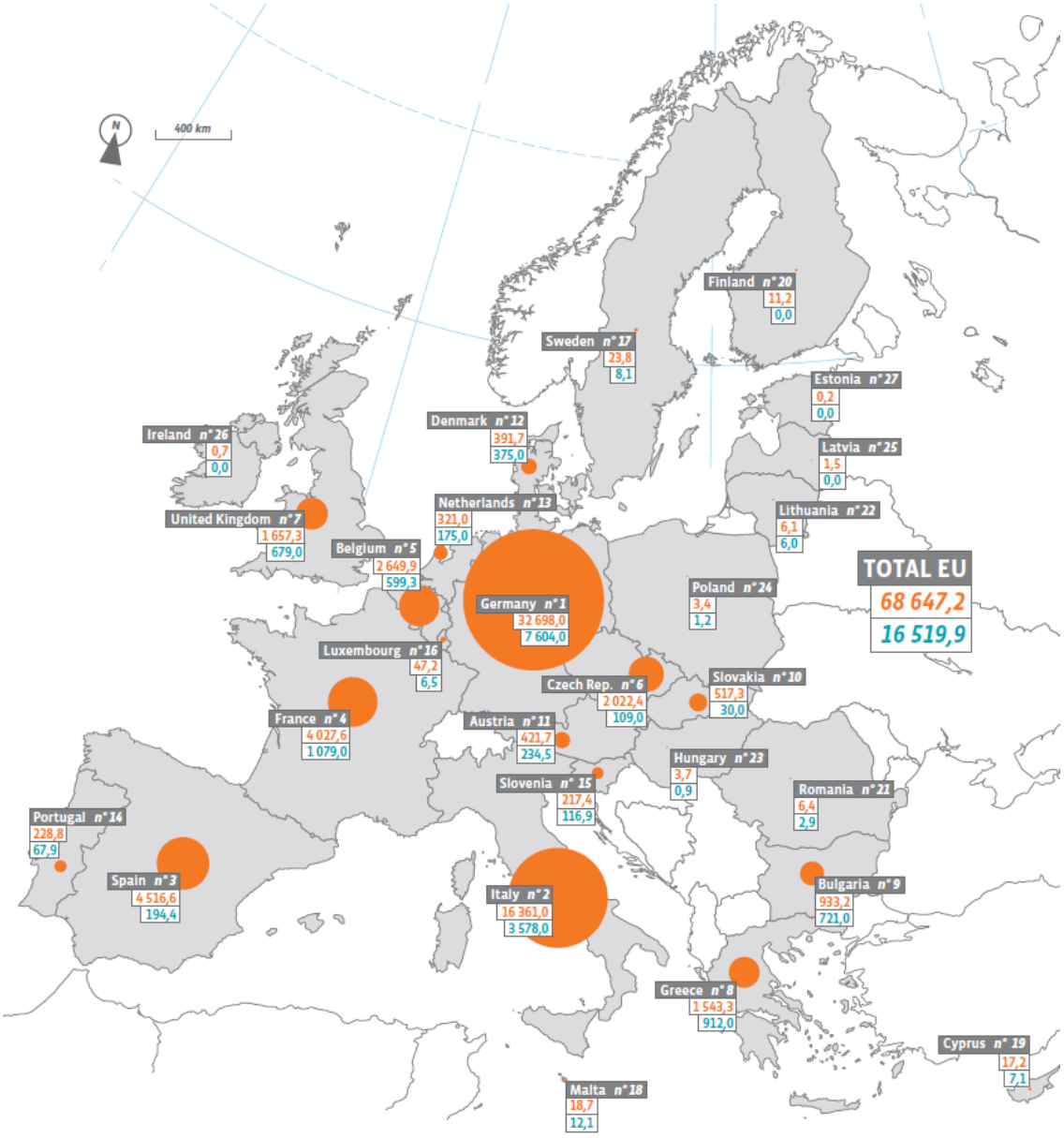


Abbildung 4-5: Kumulierte und neuinstallierte Kapazitäten der EU-27-Staaten im Jahr 2012 in MW_p. **Orange Zahlen:** kumulierte Kapazitäten bis einschließlich 2012 / **blaue Zahlen:** Neuinstallationen 2012. Abbildung aus [EurObserv'ER 2013].

Wie bereits andiskutiert, verliert der europäische Markt im globalen Vergleich durch sinkende Neuinstallationsraten sukzessive seine Vormachtstellung. Dieses Verhalten korreliert mit den Rückgängen auf den großen innereuropäischen Märkten wie Deutschland und Italien sowie nicht ausreichender Kompensationskapazitäten durch die weiteren europäischen Marktteilnehmer.

Tabelle 4-4 zeigt die Neuinstallationen der Jahre 2012 und 2013 sowie die daraus resultierenden Gesamtkapazitäten im Jahr 2013 für die innereuropäischen Märkte mit einer national kumulierten Kapazität von mehr als 1 GW_p.

Tabelle 4-4: Neuinstallationen der Jahre 2012 und 2013 für innereuropäische Märkte mit einer kumulierten Kapazität von mehr als 1 GW_p im Jahr 2013. Daten nach [Masson *et al.* 2013], [IEA 2014] und [EurObserv'ER 2013].

			Nation										
		Einheit	**Deutschland**	**Italien**	**Spanien**	**Frankreich**	**Belgien**	**Groß-britannien**	**Griechenland**	**Tschechien**	**Rumänien**	**Bulgarien**	**Europa**
Neuinstallation im Jahr	**2012**	MW_p	7.604	3.578	194	1.079	599	679	912	109	2,9	721	17.580
	2013	MW_p	3.304	1.461	152	613	215	1.000	1.043	88	1.150	10	10.253
	Kumuliert 2013	GW_p	~ 35,5	~ 17,6	~ 5,6	~ 4,6	~ 3,0	~ 2,9	~ 2,6	~ 2,2	~ 1,2	~ 1,0	~ 80

Auffallend ist die sich fortsetzende Marktführerschaft von Deutschland und Italien im Bereich der jährlich neuinstallierten Kapazität obschon der beschriebenen Reduktion auf 43 % des Vorjahres in Deutschland und auf 41 % des Vorjahres in Italien. Andererseits scheint sich der Markt für Neuinstallationen in anderen europäischen Staaten wie Griechenland und Großbritannien auf einem verhältnismäßig hohen Niveau zu stabilisieren oder sukzessive Konstanz anzustreben. Spanien und Tschechien hingegen, die mit ihrem unsteten Kapazitätszuwachs den Sprung in das Cluster der europäischen Märkte mit mehr als 1 GW_p kumulierter Leistung schafften, verharren weiter auf einem, bezüglich der kumulierten Kapazitäten, geringem Niveau.

Weiter ist der Tabelle 4-4 zu entnehmen, dass Rumänien seine Gesamtkapazitäten fast vollends im Jahr 2013 installiert hat. Ähnlich stellt sich der bulgarische Markt dar; jedoch um ein Jahr nach vorn verschoben. Dort wurde 2012 fast die gesamte Kapazität zugebaut (2011: ~ 100 MW_p Zubau). Die 2013 auftretende Flaute deutet auf ein ähnliches Verhalten wie das des spanischen Marktes ab 2009 und des tschechischen Marktes ab 2011 hin. Erste Vermutungen schreiben dem rumänischen Markt ab 2014 ebenfalls eine analoge Entwicklung zu.

Die zukünftige Entwicklung des europäischen Marktes ist für die kommenden Jahre ungewiss und imponderabel. Drastische Verringerungen der Einspeisetarife in markt-führenden europäischen Nationen werden den Markt auf dem niedrigen Niveau stabilisieren, wenn nicht sogar weiter schrumpfen lassen [IEA 2013, S. 25]. Es ist nicht davon auszugehen, dass aufstrebende kleinere Märkte diesen Verlust kompensieren können. Ungeachtet dessen stellt die Photovoltaik in Europa 2013 den zweit größten

Kapazitätszubau nach der Windenergie, jedoch vor Wasserkraft und allen sonstigen Elektrizitätsquellen[33] dar [IEA 2014 S. 13]. Nachstehende Tabelle 4-5 stellt die nationalen Aktionspläne für erneuerbare Energie[34] der EU-Mitgliedsstaaten, die 2020 mindestens 1 GW_p kumulierte Leistung installiert haben wollen, den 2013 jeweils erreichten Gesamtkapazitäten und die zur Erreichung der entsprechenden NREAPs notwendigen (linearen) jährlichen Marktbeiträge gegenüber.

Tabelle 4-5: Ziele der NREAPs der EU-Mitgliedsstaaten, die bis 2020 mindestens 1 GW_p kumulierte Leistung vorschreiben sowie deren kumulierte Kapazitäten 2013 und benötigte Zubauraten. Daten nach [Masson *et al.* 2013, S.28].

		Nation								
	Einheit	**Belgien**	**Deutschland**	**Frankreich**	**Griechenland**	**Großbritannien**	**Italien**	**Portugal**	**Spanien**	**Tschechien**
Kumuliert 2013	GW_p	~ 3,0	~ 35,5	~ 4,6	~ 2,6	~ 2,9	~ 17,6	~ 0,2	~ 5,6	~ 2,2
NREAP Ziel 2020	MW_p	1.340	51.753	4.860	2.200	2.680	8.000	1.000	8.367	1.695
Notwendige jährliche Neuinstallationen (linear)[35]	MW_p	-	2.032	33	-	-	-	100	346	-
Ziele bereits erreicht	Jahr	2011			2013	2013	2011			2010

Mitte 2013 beendete beispielsweise Italien sein Einspeisevergütungsprogramm durch das Erreichen der Förderobergrenze von jährlich 6,7 Milliarden Euro. Andere Modelle wie Net Metering und Eigenverbrauch scheinen nicht geeignet zu sein, dieses Defizit kurzfristig auszugleichen. Die Tabelle zeigt, dass selbst auf europäischer Ebene kaum mehr Anreize für ein nationales Marktwachstum bestehen. Tschechien, Bulgarien und Rumänien beispielsweise erreichten mit ihrem sprunghaften Zubau innerhalb eines Jahres die im entsprechenden NREAP vorgegebenen Mindestkapazitäten.

Trotz alledem stellt [Masson *et al.* 2013, Seite 25] die Prognose, dass die europäischen kumulierten Kapazitäten spätestens Ende 2015 die 100 GW-Marke übersteigen. Großbritannien beispielsweise gibt laut [DECC 2013] für 2020 auf nationaler Ebene ein Ziel von 20 GW_p kumulierte Kapazität aus; es wird ein konstanter jährlicher Kapazitätszubau von 2,5 bis 3 GW_p in den nächsten Jahren erwartet. Bleiben andere große europäische

[33] Umfassen auch fossile und nukleare Kapazitäten.

[34] Engl.: National Renewable Energy Action Plan (NREAP)

[35] Idealisierter Minimalwert ungeachtet eines möglichen Ersatzes von Altanlagen durch Neuinstallationen.

Märkte auf einem stabilen Niveau, könnte sich Großbritannien so zu einem der größten europäischen Photovoltaikmärkte entwickeln und dem gesamteuropäischen Markt Stabilität verleihen.

Laut der Tabelle 4-5 besitzt alleinig Deutschland ein auf europäischer Ebene ambitioniertes Ziel. Sollte sich der großbritannische Markt wie erwartet entwickeln, bliebe Deutschland weiterhin Marktführer; zumindest im Bereich der kumulierten Kapazitäten. Wie Deutschland seinen Spitzenplatz im europäischen Marktgefüge und im globalen Vergleich erlangen konnte und welche Ausprägungen dessen zukünftiger Markt aufzuweisen vermag, soll nun im nachstehenden Kapitel forciert werden.

4.2.3 Besonderheiten des deutschen Marktes

Der deutsche Markt nahm in den letzten 20 Jahren bei den jährlichen Neuinstallationen und den sich daraus ergebenden kumulierten Kapazitäten sowohl in Europa, als auch im globalen Vergleich eine beeindruckende Entwicklung. Diese ist auf das Wirken verschiedenster nationaler Investitionsförderungs- und Vergütungsprogramme zurückzuführen. Mit Anbeginn des Bund-Länder-1.000-Dächer-Photovoltaik-Programmes (kurz: 1.000-Dächer-Programm), initiiert durch das ehemalige Bundesamt für Forschung und Technologie (kurz: BMFT) im September 1990, wurde der deutsche Photovoltaikmarkt „belebt“. Die bis dato kumulierte installierte Kapazität netzgekoppelter Anlagen wird auf circa 1 MW_p geschätzt [Rindelhardt *et al.* 1995]. Dabei handelte es sich vorwiegend um Forschungsanlagen wie in:

- Pellworm: 300 kW_p, Baujahr 1983
- Kobern-Gondorf: 344 kW_p, Baujahr 1988
- Neunburg vorm Wald: 278 kW_p, Baujahr 1990 stufenweise

Photovoltaik galt bis in die frühen 1990er in Deutschland vordergründig als eine Option zur Versorgung netzferner Inselanlagen und zur Stromversorgung von Kleinsystemen wie Parkscheinautomaten oder Taschenrechnern. Dies änderte sich relativ zügig und nachhaltig mit dem Greifen des 1.000-Dächer-Programmes. Zur weiteren Diskussion zeigt die folgende Abbildung 4-6 die jährlich neu installierten Kapazitäten in Deutschland von 1990 bis 1999.

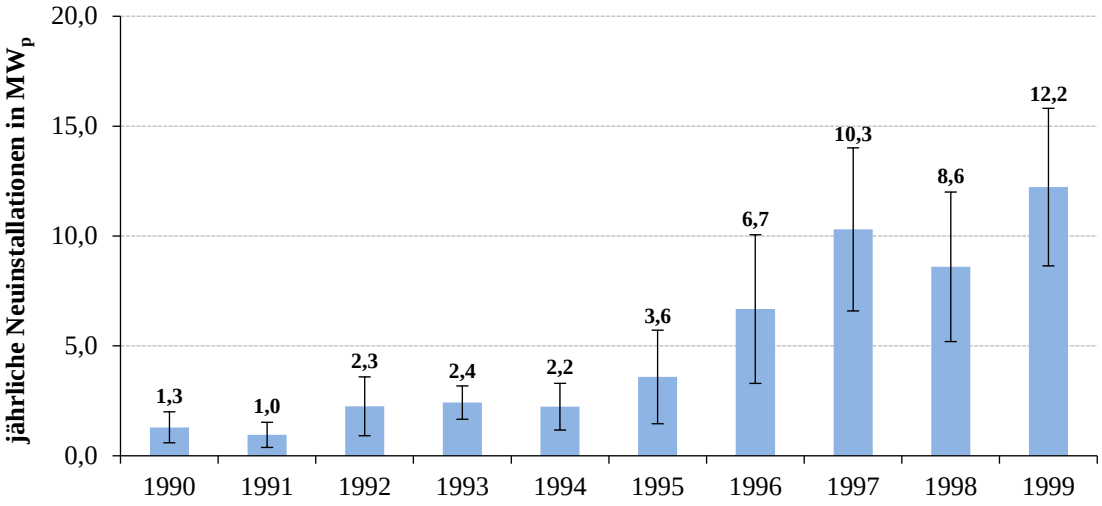


Abbildung 4-6: Deutschlandweite Neuinstallationen in MW_p von 1990 bis 1999 mit Standardabweichungen. Daten nach [Sander *et al.* 2004], [IEA 2013], [BMWi 2014b] und [Kübler 2013].

Die dargestellten Werte der jährlichen Neuinstallationen sind Durchschnittswerte der Angaben aus den aufgeführten Quellen. Die relativen Standardabweichungen sind mit 30 bis 60 % auf einem hohen Niveau. Dies ist der breiten Streuung der Angaben geschuldet. Absolut sind die Abweichungen bei der weiteren Betrachtung (spätere Neuinstallationen beispielsweise ab 2007 über 1.000 MW_p jährlich) jedoch vernachlässigbar klein und fallen besonders bei den sich anschließenden kumulierten Betrachtungen nicht ins Gewicht, sodass sie obschon ihrer relativen Ausprägung nicht Gegenstand der weiteren Diskussion sein sollen.

Wie bereits angedeutet, kam es mit der Initiierung des 1.000-Dächer-Programms erstmals zu einem wahrnehmbaren Aufschwung des nationalen Marktes. Bereits mit den Neuinstallationen des Jahres 1991 verdoppelte sich die bis dato kumulierte Kapazität in Deutschland. Das Programm war als bundesweiter Breitentest zur Förderung und Erprobung von netzgekoppelten Photovoltaikanlagen auf Ein- und Zweifamilienhäusern in den alten Bundesländern vorgesehen. Es wurde zwischen 1990 und 1994 mit jährlich rund 100 Mio. DM gefördert. Nach der politischen Wiedervereinigung Deutschlands wurde das Programm zudem im Juli 1991 auf die neuen Bundesländer ausgedehnt. Die Förderung beschränkte sich auf kleine Photovoltaikanlagen mit einer Standardleistung von 1 bis 5 kW_p und auf eine maximale Anzahl von 150 Neuanlagen je Flächenstaat sowie 100 Neuanlagen je Stadtstaat. Die anlagenspezifische Fördersumme betrug 70 % der Anlagen- und Installationskosten.

Laut [BMFT 1990] galt der Breitentest vordergründig folgenden Zielen:

- Demonstration der Nutzung von Dachflächen für die dezentrale Stromerzeugung aus Sonnenenergie und ihre Vereinbarkeit mit baulichen und architektonischen Gesichtspunkten,
- Weckung der Bereitschaft, den Stromverbrauch im Haushalt, soweit möglich, dem Rhythmus der Solarstromerzeugung anzupassen und durch Einsatz energiesparender Geräte zu erreichen, dass der erzeugte Solarstrom einen möglichst großen Anteil an der gesamten Stromversorgung des Haushaltes ausmacht,
- Gewinnung von Know-how in der kostengünstigen, zuverlässigen, weitgehend standardisierten und sicheren Installation netzgekoppelter dachmontierter Photovoltaikanlagen,
- Sammeln von Erfahrungen über das Betriebsverhalten der photovoltaischen Anlagen mit dem Ziel einer technischen Optimierung aller Komponenten.

Offizieller Antragsschluss des Förderprogrammes war der 30.06.1993. Bis dahin gingen circa 60.000 allgemeine Anfragen ein, woraus 4.000 konkrete Prüfanträge resultierten. Infolge dessen wurden zwischen 1991 und 1995 rund 2.000 netzgekoppelte Photovoltaikanlagen in Deutschland installiert. Für die nachfolgende regionale Betrachtung sei an dieser Stelle erwähnt, dass am 27.01.1992 bei Dresden die erste im Rahmen des Programmes geförderte Anlage errichtet wurde und am 22.12.1994 in Marbach die Netzschaltung der 150sten sächsischen Anlage erfolgte.

Das Förderprogramm wurde von einem wissenschaftlichen Mess- und Auswertungsprogramm begleitet, welches bis Ende 1997 realisiert wurde.

Im Januar 1991 wurde das Stromeinspeisegesetz eingeführt, welches die Energieversorger erstmals zur Abnahme und Vergütung von erzeugtem Strom aus erneuerbaren Energiequellen, wie beispielsweise Windkraft und Photovoltaik, verpflichtete. Die festgelegten Vergütungssätze für Solarstrom orientierten sich an 90 % des Durchschnittserlöses der jeweiligen zwei vorherigen Jahre und betrugen so rund 17 Pfennig je kWh. Die Höhe der so festgelegten Vergütungssätze gaben jedoch bei damaligen Stromgestehungskosten von rund 1,80 DM je kWh keinen finanziellen Anreiz für die Errichtung von Photovoltaikanlagen und deren rentablen Betrieb. 1995 erreichte der Solarenergie-Förderverein Aachen e.V. schließlich die Einführung einer kostendeckenden Vergütung für Solarstrom von 2 DM je kWh in Aachen. Die als Aachener

Modell bekanntgewordene kostendeckende Vergütung wurde alsdann von verschiedenen Stadtwerken übernommen und führte zu einem regional punktuellen Marktwachstum der jährlichen Neuinstallationen ab 1995. So konnte sich der bis 1994 verhalten anwachsende und doch stabile innerdeutsche Markt für den jährlichen Kapazitätszubau bereits 1996 verdreifachen und wuchs bis 1997 um das 4,5-fache.

Nach den Zuwächsen von 1995 bis 1997 stabilisierte sich der deutsche Markt wieder auf einem Niveau. Erst 1999, mit dem Greifen des von der deutschen Kreditanstalt für Wiederaufbau (kurz: KfW) eingeführten 100.000 Dächer-Solarstrom-Programmes und des im April 2000 initiierten Gesetzes für den Vorrang Erneuerbarer Energien (auch: Erneuerbare-Energien-Gesetz, kurz: EEG), änderte sich die Situation schlagartig, was sich in einem bis dato ungeahnten Boom der Photovoltaik äußerte.

Das 100.000 Dächer-Solarstrom-Programm der KfW diente „der langfristigen Finanzierung von Investitionen in die Errichtung von Photovoltaik-Anlagen in Deutschland zu einem besonders attraktiven Festzinssatz“ [KfW 2003, Seite 1].

Laut [KfW 2003] waren Eckdaten des Programmes unter anderem:

- ein Programmziel von maximal 300 MW_p neu installierter Photovoltaikleistung;
- die Förderung der Errichtung oder Erweiterung von Photovoltaikanlagen an oder auf Gebäuden von Privatpersonen, freiberuflich Tätigen und kleinen bis mittleren privat gewerblichen Unternehmen[36] ab einer zu installierenden Nennleistung von mindestens 1 kW_p;
- finanziert werden neben den eigentlichen Investitionskosten für die Module auch die benötigten Wechselrichter, die Installationskosten, die Planungskosten und die Anschlusskosten;
- eine Finanzierungssumme von bis zu 6.230 € je installierten kW_p Nennleistung bis maximal 5 kW_p und 3.115 € je kW_p des darüber hinausgehenden Leistungsanteils;
- eine maximale Einzelkreditsumme von 500.000 €;
- eine maximale Kreditlaufzeit von 10 Jahren bei höchstens zwei tilgungsfreien Anlaufjahren;
- ein über die Programmdauer fester Zinssatz (effektiv 1,91 % p.a. Stand 2003) und
- eine ursprünglich geplante Laufzeit bis Ende 2004.

[36] Eine genaue Definition ist [KfW 2003] zu entnehmen.

Das auf Basis des Aachener Modells basierende und im April 2000 in Kraft getretene EEG löste das Stromeinspeisegesetz ab und war als Markteinführungsprogramm konzipiert. Darin wurden die Vergütungssätze für erzeugten Strom aus erneuerbaren Energien stärker differenziert und am Beispiel der Photovoltaik entsprechend angehoben (auf mindestens 50,6 Cent je kWh für Anlagen, die vor 2001 in Betrieb gingen, und 48,1 Cent je kWh für Anlagen, die ab 2002 in Betrieb gehen sollten). Die Kombination beider Instrumente führte zu mehr als einer Verachtfachung des Marktes für jährlich neuinstallierte Kapazitäten binnen 2 Jahren (1999: ~ 12,2 MW_p, 2001: ~101 MW_p).

Durch den ungeahnten Zuspruch in der Bevölkerung kam es Anfang 2000 zu einem Antragsstau bei der KfW. Die Laufzeit des 100.000 Dächer-Solarstrom-Programmes wurde daraufhin angepasst und bis 31.12.2003 datiert. Tatsächlich endete die Antragsfrist bereits im Juni 2003. Im EEG von 2000 war eine maximale Förderung von 350 MW_p festgehalten. Nach deren Überschreitung sollte die Vergütung für im Folgejahr neu installierte Photovoltaikanlagen entfallen. Durch das vorzeitige Auslaufen des 100.000 Dächer-Solarstrom-Programmes und damit dem Erreichen des im EEG definierten Fördermaximums (bereits im Jahr 2003) wurde mit einem massiven Markteinbruch ab 2004 gerechnet. Um den Wegfall des 100.000 Dächer-Solarstrom-Programmes zu kompensieren und einen Markteinbruch zu verhindern wurde bereits am 22. Dezember 2003 die erste Novelle des EEG verabschiedet und trat am 1. August 2004 in Kraft.

Die genauen Mechanismen des EEG und dessen Novellen sollen nicht Gegenstand dieser Diskussion sein, vielmehr wird der Fokus auf deren Marktwirkung, beziehungsweise die Reaktion des Marktes gelegt.

Während der Zeit zwischen 2000 und 2003 stabilisierte sich der deutsche Markt für Neuinstallationen auf einem gleichbleibenden Niveau ob der Bewilligungsstaffelung der Anträge aus dem 100.000 Dächer-Solarstrom-Programm. Mit dem Jahr 2004 erfuhr der Markt wiederum einen erheblichen Aufschwung. Verglichen zu den drei Jahren 2001, 2002 und 2003 stieg er im Jahr 2004 auf nahezu das fünffache Volumen.

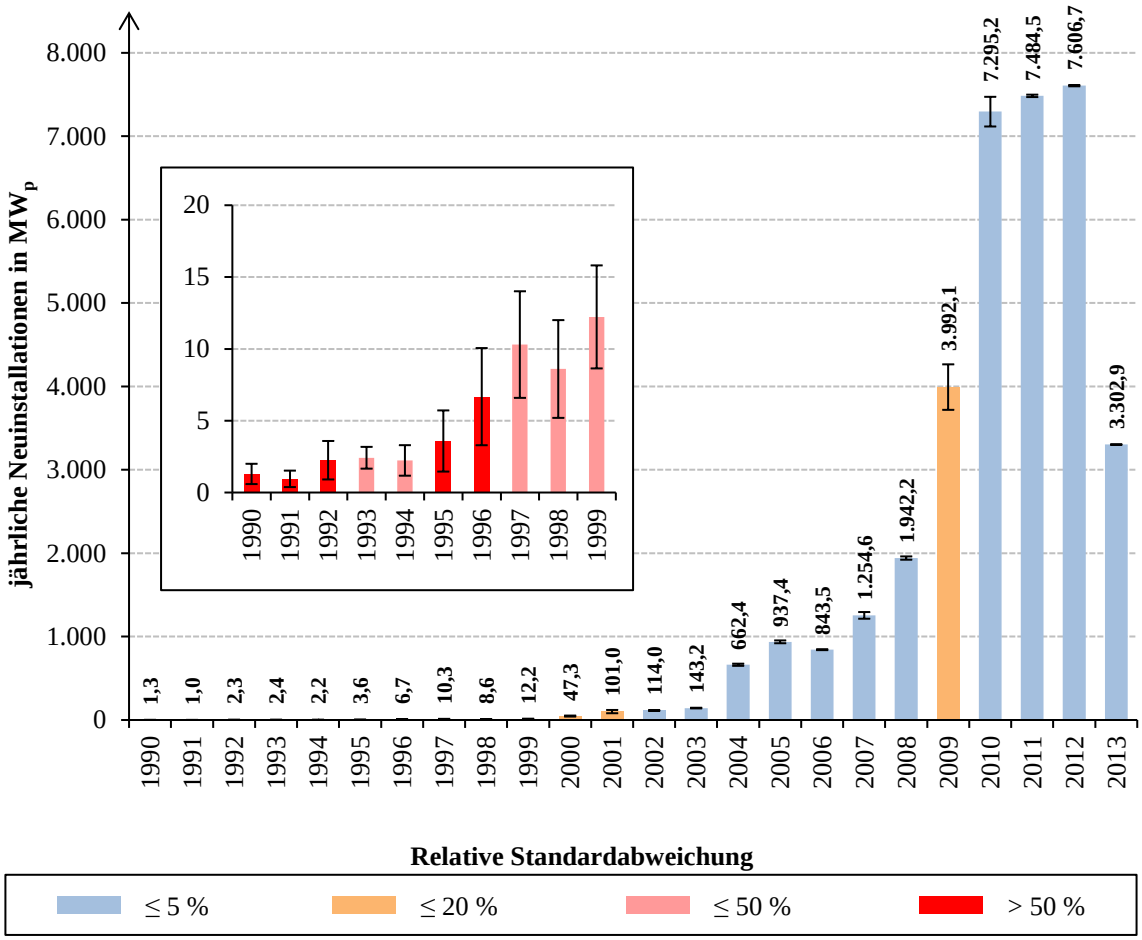


Abbildung 4-7: Deutschlandweite Neuinstallationen in MW_p von 1990 bis 2013 mit relativen und absoluten Standardabweichungen und Detailausschnitt für die Jahre 1990 bis 1999. Daten nach [Sander *et al.* 2004], [IEA 2013], [BMWi 2014b], [Kübler 2013], [BSW-Solar 2014a], [Wissing 2012], [Nitsch *et al.* 2012], [Proteus 2014] und [BNA 2014].

Einen Gesamtüberblick der Entwicklung des Marktes der jährlichen Neuinstallationen in Deutschland gibt Abbildung 4-7. Darin sind die jährlichen Kapazitätszuwächse von 1990 bis 2013, inklusive einer Detailansicht der Jahre 1990 bis 1999, dargestellt. Die Färbung der Säulen orientiert sich an der relativen Standardabweichung der Daten für die einzelnen Jahre. Im Anhang 4-1 finden sich die Einzeldaten der verschiedenen Quellen sowie die sich daraus ergebenden absoluten und relativen Standardabweichungen tabellarisch zusammengefasst.

Im Zeitraum zwischen 2004 und 2008 verhielt sich der innerdeutsche Markt für Neuinstallationen unstetig. Wenngleich sich das Marktvolumen im benannten Zeitraum nahezu verdreifachte (2004: 662,4 MW_p Neuinstallationen, 2008: 1.942,2 MW_p Neuinstallationen), brach der Markt im Jahr 2006 leicht ein. Mit dem starken Anstieg 2008 konnte jedoch innerhalb eines Jahres fast die komplette, bis 2005 kumuliert installierte Kapazität in Deutschland (Ende 2005 knapp 2 GW_p kumulierte Kapazität), neuinstalliert werden. Auf das Inkrafttreten der erneuten EEG-Novellierung (Beschluss: 6. Juni 2008)

am 01. Januar 2009 reagierte der Markt mit eminenten absoluten Zuwächsen in zwei aufeinanderfolgenden Jahren. Im Jahr 2009 verdoppelten sich die Neuinstallationen bezogen auf das Niveau von 2008. Im darauf folgenden Jahr konnte sich der Markt zwar nicht verdoppeln, erreichte aber mit absolut knapp 7,3 GW_p Neuinstallationen einen bis dato globalen Rekordwert. Weiter konnten so alle bis Ende 2008 kumuliert installierten Kapazitäten in Deutschland wiederum innerhalb eines Jahres neuinstalliert werden. Zum besseren Verständnis zeigt Abbildung 4-8 die jährliche Entwicklung der kumulierten Kapazitäten Deutschlands von 1990 bis 2013.

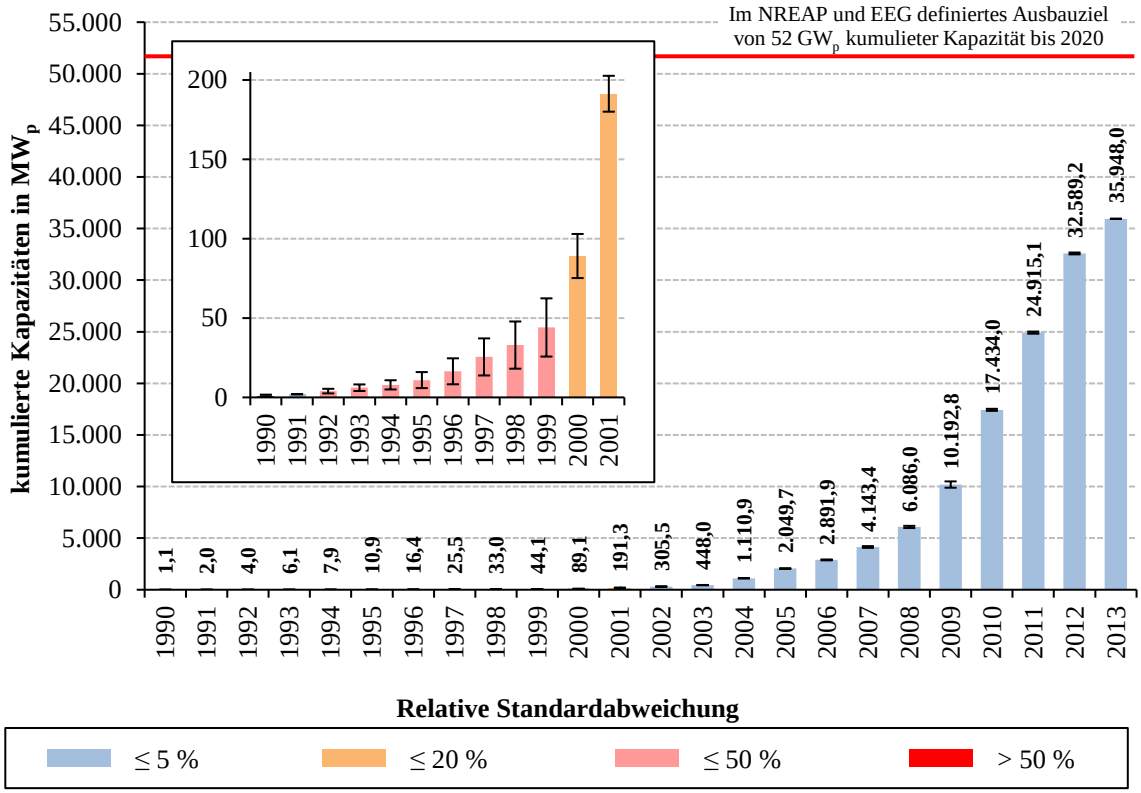


Abbildung 4-8: Kumulierte Kapazitäten in Deutschland von 1990 bis 2013 in MW_p mit relativen und absoluten Standardabweichungen und Detailausschnitt für die Jahre 1990 bis 2001. Daten nach [IEA 2013], [BMWi 2014b], [Kübler 2013], [Wissing 2012] und [Nitsch *et al.* 2012].

Die entsprechenden Rohdaten, die berechneten absoluten und relativen Standardabweichungen sowie eine vergleichende Angabe der aus den Durchschnittsdaten der Abbildung 4-8 berechneten kumulierten Sollmenge und deren Abweichung findet sich im Anhang 4-2. Die Färbung der Säulen in der Abbildung 4-8 erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie in der Abbildung 4-7. Wenngleich die relativen Standardabweichungen der Daten zu den jährlichen Neuinstallationen bis 2001 auf einem hohen Niveau liegen, zeigt Abbildung 4-8, dass diese durch ihren geringen absoluten Beitrag gegenüber den nach 2001 installierten Kapazitäten zu vernachlässigen sind und nicht weiter ins Gewicht fallen.

In den Jahren 2011 und 2012 konnte sich der Markt des jährlichen Kapazitätszubaus auf dem hohen Niveau von 2010 stabilisieren. Erst nach dem Inkrafttreten der wiederholten EEG-Novellierung am 1. Januar 2012 und des Gesetzes zur Änderung des Rechtsrahmens für Strom aus solarer Strahlungsenergie und weiteren Änderungen im Recht der erneuerbaren Energien (kurz: PV-Novelle) Ende Juni 2012 erfuhr der Markt im darauf folgenden Jahr eine Schrumpfung um mehr als 55 % bezogen auf das Niveau von 2012. Ein Grund dafür können die in der EEG-Novelle von 2012 vorgenommenen Kürzungen der Einspeisetarife für erzeugten Strom aus solarer Strahlungsenergie darstellen. Viel schwerer fallen jedoch die Formulierungen der PV-Novelle ins Gewicht. Darin wurde das Fördervolumen auf ein Ausbauziel von 52 GW_p begrenzt. Zusätzlich wurde ein jährlicher „Ausbaukorridor“ von 2,5 bis 3,5 GW_p festgelegt. Je nach Erfüllungsstand erfolgt eine zubauabhängige Steuerung der Degression. Die Definition eines Ausbaukorridors scheint bereits im Jahr 2013 seine Wirkung auf den Markt nicht verfehlt zu haben; mit rund 3,3 GW_p neuinstallierter Kapazitäten im Jahr 2013 ist die Zielvorgabe soweit erreicht.

Trotz des Markteinbruchs im Jahr 2013 resultieren mehr als 70 % der in Deutschland installierten Gesamtkapazitäten aus den Neuinstallationen der Jahre 2010 bis 2013. Mit der anstehenden Novellierung des EEG 2014 wird von einer weiteren Schrumpfung, maximal jedoch einer Stabilisierung auf dem Niveau von 2013 ausgegangen. Diese Annahme wird neben der Neujustierung des Ausbaukorridors an die Ziele des NREAP (angestrebtes jährliches Zubauziel von 2,5 GW_p) im Eckpunktpapier der Bundesregierung zur kommenden EEG-Reform [BMWi 2014a] auch durch die Einschätzung verschiedener Experten wie beispielsweise Herr Florian Fabel, Mitglied der Geschäftsleitung FR-Frankensolar GmbH, und Herr Alexander Gerlach, Senior Specialist im Bereich Global Market Intelligence bei der Hanwha Q Cells GmbH, bekräftigt, welche mit einer Marktgröße für Neuinstallationen von 2 bis 2,5 GW_p für das Jahr 2014 rechnen [Ammon *et al.* 2012]. Weiter ist davon auszugehen, dass die Stabilisierung des Marktes für jährliche Neuinstallationen auf den im Eckpunktepapier neu definierten Ausbaukorridor in Zukunft Bestand haben wird. Dementsprechend ist mit der anstehenden EEG-Reform in naher Zukunft kein nationales Marktwachstum abzusehen.

Wenngleich auf den Markt des jährlichen Kapazitätszubaus in Zukunft neben den reinen Neuinstallationen die Substitution von Altanlagen additional wirken wird, ist bei einer angenommenen Lebensdauer eines PV-Moduls von 25 Jahren erst zwischen 2030 und 2035 mit einem spürbaren Effekt ob des vergleichsweise geringen jährlichen Installationsvolumens vor 2007 zu rechnen (vgl Kapitel 5.2). Ebenfalls sind derzeit die Bedingungen für Neuinstallationen und Ersatzinstallationen nach dem Erreichen des im NREAP definierten Ausbauziels noch unklar, wodurch eine Prognose zukünftiger Neuinstallationen über das Jahr 2020 hinaus eminenten Unsicherheiten unterliegen würde.

Stärker differenziert betrachtet stellt sich die Frage nach der regionalen Verteilung der installierten Kapazitäten in Deutschland, welcher im nachstehenden Kapitel, mit Fokus auf die Region Sachen samt Anrainern, nun nachgegangen wird.

4.2.4 Regionale Entwicklungen

Wie eben angedeutet, erfolgt in diesem Kapitel eine regional differenzierte Betrachtung zu den installierten Kapazitäten in Deutschland. Nach einem kurzen historischen Aufriss wird der Fokus dann auf Sachsen samt Anrainern gelegt. Neben den Bundesländern Bayern, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Brandenburg (inklusive Berlin) werden auch Teilgebiete der beiden Nachbarstaaten Polen und Tschechien in die Betrachtungen mit eingeschlossen.

Die Verteilung der installierten Kapazitäten gestaltet sich in Deutschland regional stark unterschiedlich. Dieser Kontrast resultiert aus heterogenen Rahmenbedingungen in den einzelnen Bundesländern. So geht allein aus der Unterteilung in Flächen- und Stadtstaaten evident hervor, dass in den einzelnen Bundesländern unterschiedliche Potenziale durch ungleich zur Verfügung stehende Flächen bestehen. Weitere Kriterien sind, um nur wenige zu nennen, beispielsweise Unterschiede in der Bevölkerungsdichte und verschiedene historisch gewachsene Traditionen.

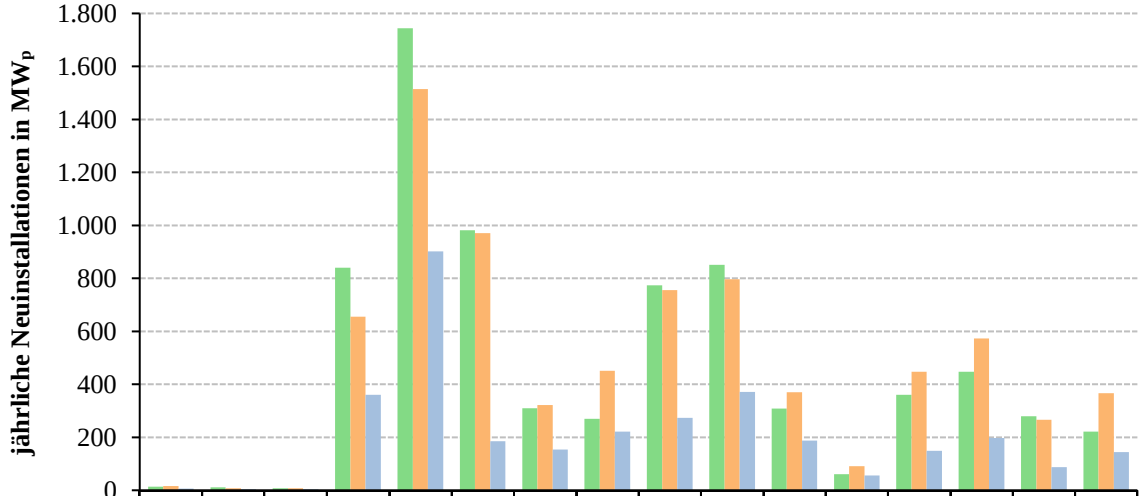
Exemplarisch zeigt der Vergleich der absoluten Zahlen, dass die Summe der installierten Kapazitäten aller drei Stadtstaaten 2013 weniger als 42 % der kumulierten Kapazitäten des Flächenstaates mit den geringsten Gesamtkapazitäten ausmacht. Andererseits sind die installierten Kapazitäten je Quadratmeter in Berlin Stand 2013 höher als in den Flächenstaaten Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern oder Thüringen. Noch eine

andere Sichtweise gibt der Einbezug der Bevölkerungsdichte auf. So besitzt Brandenburg 2013 zwar nur rund ¼ der kumulierten Kapazitäten von Bayern, im bundesweiten Vergleich jedoch die höchste installierte Leistung je Einwohner.

Von Interesse sind an dieser Stelle indes nur die absoluten jährlich neuinstallierten Kapazitäten, die sich daraus ergebenden Gesamtkapazitäten und der aktuelle Anlagenbestand. Die anderen Kriterien und statistischen Kennzahlen sollen indessen der Untersuchung möglicher Potenziale und Prognosen zukünftiger Entwicklungen vorbehalten bleiben.

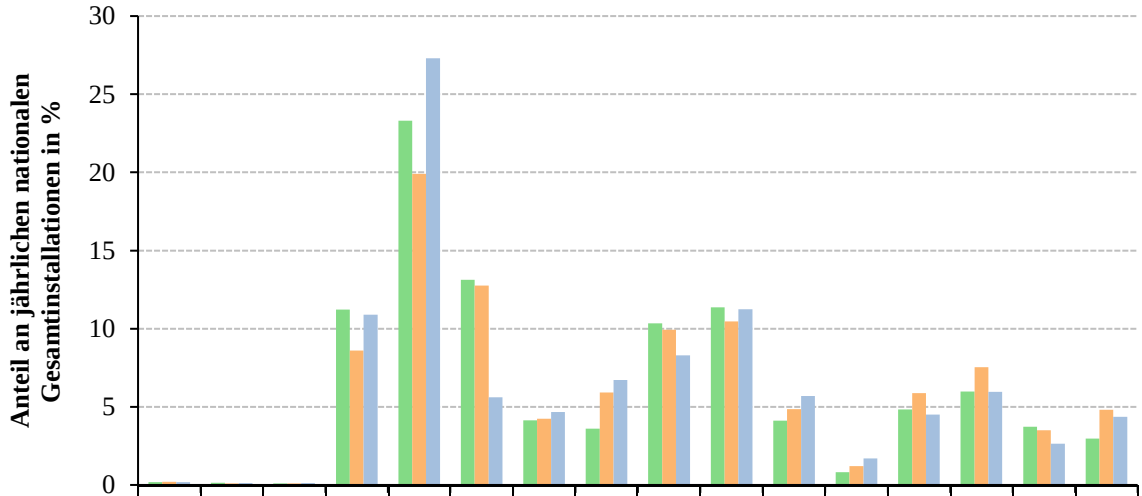
Der Einbruch des gesamtdeutschen Marktes für jährliche Neuinstallationen ab 2013 ist nicht auf einen dramatischen Rückgang eines oder weniger bundeslandspezifischer Märkte zurückzuführen. Die regionalen Verteilungen der bundeslandspezifischen Anteile am jährlichen, gesamtdeutschen Kapazitätszubau für die Jahre 2011, 2012 und 2013 bleiben obschon der Schrumpfungen der absoluten Zubauzahlen auf einem stabilen Niveau. Einzig die beiden Bundesländer Bayern und Brandenburg zeigen im benannten Zeitraum eine gegenläufige Entwicklung, wobei deren absoluten Beträge aber nicht zur Erklärung des gesamtdeutschen Markteinbruchs ausreichen. Vielmehr scheinen die Märkte der einzelnen Bundesländer im gleichen Maße diesen Trend zu bestimmen. Dies ist auch den beiden Abbildungen auf der folgenden Seite zu entnehmen. Abbildung 4-9 stellt hierzu die absoluten jährlichen Neuinstallationen der einzelnen Bundesländer von 2011 bis 2013 gegenüber. Abbildung 4-10 gibt darauf aufbauend die aus den Daten der Abbildung 4-9 berechneten prozentualen Anteile der bundeslandspezifischen jährlichen Neuinstallationen an den jährlich gesamtdeutschen Kapazitätszuwächsen der Jahre 2011 bis 2013 an.

Wie der Abbildung 4-9 zu entnehmen ist, brachen 2013 alle Märkte auf bundeslandebene ein. Der Vergleich mit der Abbildung 4-10 zeigt zudem, dass dabei die Verteilung der Anteile am Gesamtzubau für die Jahre 2011 bis 2013, ausgenommen die Bundesländer Bayern und Brandenburg, nahezu gleich blieb. So ist zwar der absolute Anteil am Gesamtschwund bundeslandspezifisch unterschiedlich stark ausgeprägt, der prozentuale Anteil jedoch fast auf einem Niveau. Das bedeutet, dass beispielsweise Baden-Württemberg im Vergleich zu Rheinland-Pfalz im Jahr 2013 absolut einen um 113 MW_p höheren Beitrag zum gesamtdeutschen Markteinbruch beisteuert, beide Märkte jedoch prozentual auf einem Niveau schrumpften.



	Berlin	Bremen	Hamburg	Baden-Württemberg	Bayern	Brandenburg	Hessen	Mecklenburg-Vorpommern	Niedersachsen	Nordrhein-Westfalen	Rheinland-Pfalz	Saarland	Sachsen	Sachsen-Anhalt	Schleswig-Holstein	Thüringen
2011	14	11	8	840	1.744	982	310	270	774	851	308	61	361	448	279	222
2012	16	8	8	655	1.515	971	322	451	756	797	370	91	448	573	266	366
2013	6	4	4	360	902	185	154	222	274	371	188	56	149	197	87	144

Abbildung 4-9: Bundeslandspezifische jährliche Neuinstallationen in MW_p der Jahre 2011 bis 2013. Daten bis 2012 aus [AEE 2014]; 2013 aus [Knoll und Siemer 2014] und [Proteus 2014].



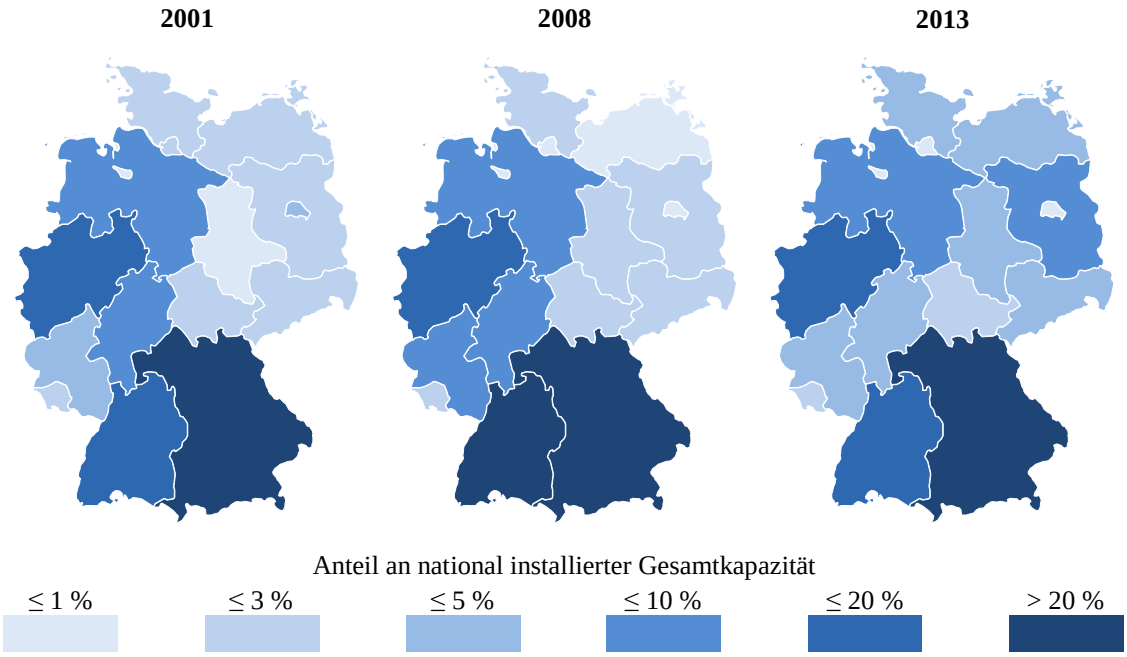
	Berlin	Bremen	Hamburg	Baden-Württemberg	Bayern	Brandenburg	Hessen	Mecklenburg-Vorpommern	Niedersachsen	Nordrhein-Westfalen	Rheinland-Pfalz	Saarland	Sachsen	Sachsen-Anhalt	Schleswig-Holstein	Thüringen
2011	0,19	0,15	0,11	11,23	23,31	13,12	4,14	3,61	10,34	11,37	4,12	0,82	4,82	5,99	3,73	2,97
2012	0,21	0,11	0,11	8,60	19,90	12,75	4,23	5,92	9,93	10,47	4,86	1,20	5,88	7,53	3,49	4,81
2013	0,18	0,12	0,12	10,90	27,31	5,60	4,66	6,72	8,30	11,23	5,69	1,70	4,51	5,96	2,63	4,36

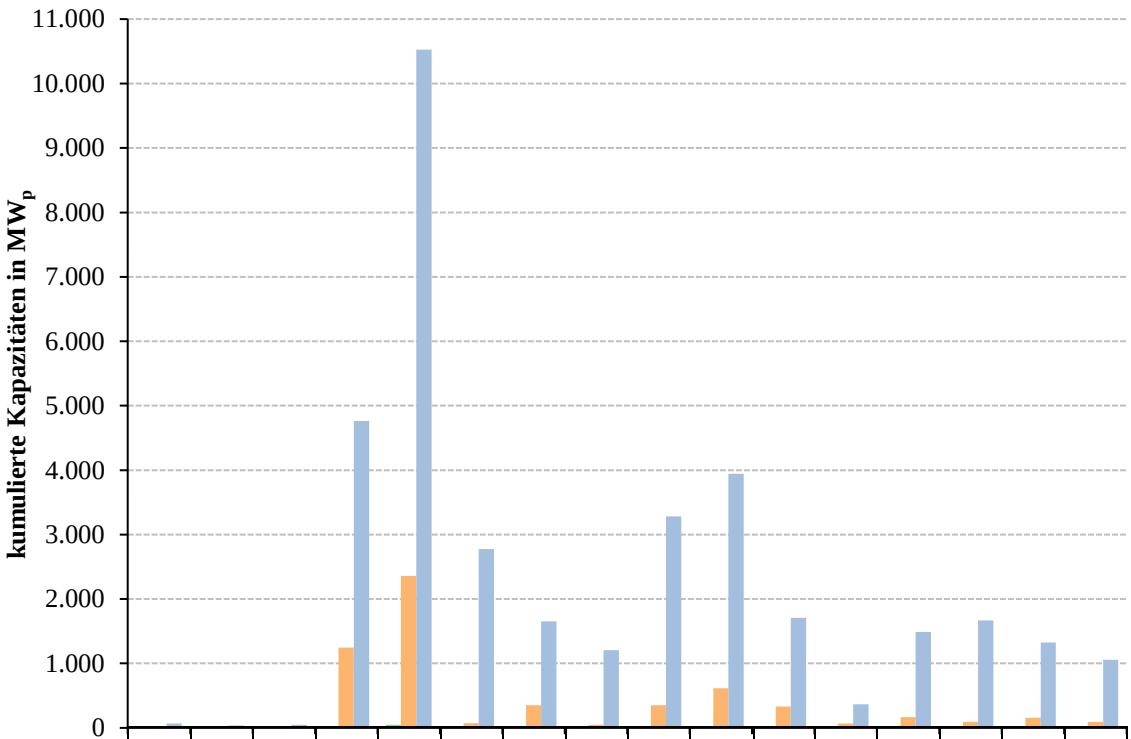
Abbildung 4-10: Prozentuale Anteile der bundeslandspezifischen jährlichen Neuinstallationen an den gesamtdeutschen jährlichen Neuinstallationen der Jahre 2011 bis 2013 in %. Werte berechnet aus Daten der Abbildung 4-9.

Ähnlich der Rolle des deutschen Marktes im europäischen Vergleich zeigt sich Bayern als dominierender Markt auf Ebene der Bundesländer. Der Freistaat Bayern stellt seit 2001 stetig die größten jährlichen Kapazitätszuwächse im gesamtdeutschen Vergleich. Neben Bayern und den sprunghaften Zubauten in Brandenburg in den Jahren 2011 und 2012 zeigen die Bundesländer Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen seit 2001 im bundesweiten Vergleich fast konstant die zweit- und dritthöchsten jährlichen Kapazitätszuwächse. Seit 2009 liegen auch in Niedersachsen, gemessen am bundesweiten Durchschnitt, konstant hohe jährliche Neuinstallationen vor. Dieses Verhalten führt letztendlich zu einer Konzentration der installierten kumulierten Kapazitäten auf die vier Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen. Ende 2013 waren rund 63 % der Gesamtkapazitäten in den vier genannten Bundesländern installiert, wobei 2013 allein in Bayern 29,3 % der deutschen Gesamtkapazitäten installiert waren. 2008 betrug der Anteil der vier Bundesländer an den kumulierten deutschen Kapazitäten sogar mehr als 76 %, wobei 39,5 % der Gesamtkapazitäten auf Bayern entfielen. Wenngleich die Daten vor 2007 inkonsistent sind, lässt sich aus ihnen jedoch ableiten, dass 2001 knapp 75 % der gesamten Kapazitäten Deutschlands in Bayern, Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen installiert waren. Bayern stellte auch 2001 schon den größten Anteil mit mehr als 35 %.

Zum leichteren Verständnis zeigt die Abbildung 4-11 auf der nachstehenden Seite die kumulierten Kapazitäten der Jahre 2001, 2008 und 2013 je Bundesland. Weiter sind die Daten nach den Anteilen der Bundesländer an der national installierten Gesamtkapazität für die drei betreffenden Jahre aufbereitet.

Neben der andiskutierten Konzentration der Gesamtkapazitäten auf die vier Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen zeigt die Abbildung 4-11 eine seit 2008 schleichend stattfindende Erhöhung der Anteile an den Gesamtkapazitäten in den neuen Bundesländern. Besonders in Brandenburg stieg der Anteil mit den Neuinstallationen der Jahre 2011 und 2012 sprunghaft an. Während dieser zwei Jahre wurden dortzulande rund 70 % der bis 2013 bundeslandinternen kumulierten Kapazitäten installiert. Weiter wurde innerhalb des Jahres 2011 die 1,5-fache Kapazität der bis dato installierten Gesamtkapazitäten neu installiert. Lag der Anteil der neuen Bundesländer (inklusive des Stadtstaates Berlin) an den gesamtdeutschen Kapazitäten im Jahr 2001 bei rund 10 % und 2008 nur noch bei rund 8,2 %, stieg er bis 2013 kontinuierlich auf 23 %.





	Berlin	Bremen	Hamburg	Baden-Württemberg	Bayern	Brandenburg	Hessen	Mecklenburg-Vorpommern	Niedersachsen	Nordrhein-Westfalen	Rheinland-Pfalz	Saarland	Sachsen	Sachsen-Anhalt	Schleswig-Holstein	Thüringen
2001	4	1	2	23	48	2	7	2	7	17	4	2	2	1	3	2
2008	11	4	7	1.245	2.359	72	350	48	352	617	332	67	168	94	159	95
2013	67	37	47	4.762	10.526	2.776	1.654	1.206	3.283	3.944	1.707	366	1.487	1.668	1.327	1.059

Abbildung 4-11: oben: Anteile der Bundesländer an national installierter Gesamtkapazität der Jahre 2001, 2008 und 2013. / **unten:** kumulierte Kapazitäten je Bundesland der Jahre 2001, 2008 und 2013. / Daten bis 2012 aus [AEE 2014]; 2013 aus [Knoll und Siemer 2014] und [Proteus 2014].

Ein völlig anderes Bild ergibt bei der Fokussierung auf Sachsen samt der angrenzenden Bundesländer Bayern, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Brandenburg sowie des Stadtstaates Berlin. Der Vergleich der Summe der installierten Kapazitäten dieser sechs Bundesländer mit den kumulierten Kapazitäten der restlichen zehn deutschen Bundesländer zeigt, dass in betreffender Region seit 2008 zwischen 46,8 und 49 % der gesamtdeutschen Kapazitäten installiert waren. Da, wie bereits angedeutet, die Daten vor 2007 inkonsistent sind, ist die Angabe der prozentualen Anteile der sechs Bundesländer an der kumulierten Kapazität Deutschlands vor 2007 nicht zu 100 % stichhaltig. Bis einschließlich 2001 können aber Anteile von über 45 % ob der vergleichsweise hohen Kapazitäten Bayerns angenommen werden.

Durch die hohen Neuinstallationen in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2012 in Verbindung mit den hohen Anteilen an den jährlichen Neuinstallationen der betrachteten Region ab 2008 stammt das Gros der Anlagen der sechs Bundesländer (im Durchschnitt rund 73 %) aus den Neuinstallationen nach 2009. Die folgende Tabelle zeigt dafür die prozentualen Anteile der installierten Kapazitäten an der jeweils bundeslandspezifischen kumulierten Kapazität nach unterschiedlichen Bezugszeiträumen.

Tabelle 4-6: Zeitraumabhängige relative Anteile installierter Kapazitäten an bundeslandspezifischen Gesamtkapazitäten mit Stand 2013.

Angaben in %		Zeitraum nach					
		2008	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**Gesamtkapazität 2013**
Bundesland	**Berlin**	83,6	71,6	53,7	35,8	17,9	67 MW_p
	Bayern	77,6	62,4	39,5	23,0	8,6	10.526 MW_p
	Brandenburg	97,4	92,1	77,0	41,6	6,7	2.776 MW_p
	Sachsen	88,7	80,6	64,4	40,1	10,0	1.487 MW_p
	Sachsen-Anhalt	94,4	89,1	73,0	46,2	11,8	1.668 MW_p
	Thüringen	91,0	85,0	69,1	48,2	13,6	1.059 MW_p
	Gesamt	84,1	72,6	52,6	31,1	9,0	

Wie der Tabelle 4-6 zu entnehmen ist, setzt sich die kumulierte Kapazität der sechs Bundesländer hauptsächlich aus den Neuinstallationen der Jahre 2010 bis 2012 zusammen. Am Beispiel von Sachsen wird deutlich, dass 80,6 % der 2013 kumulierten Kapazität von 1.487 MW_p nach 2009 installiert wurden. Noch flagranter stellt sich die Situation in Brandenburg dar. Dortzulande wurden über 92 % der kumulierten Kapa-

zitäten erst zwischen 2010 und 2013 installiert. Folglich ist in der betrachteten Region in naher Zukunft nicht mit einem übermäßigen Beitrag zum Markt jährlicher Neuinstallationen durch Substitution von Altanlagen ob des geringen Altanlagenbestandes (Anlageninstallation vor 2009) zu rechnen.

Da Bayern seit 2001 die größten Anteile an den deutschen Gesamtkapazitäten und jährlichen Neuinstallationen stellt, zeigt sich an dieser Stelle ein von den anderen fünf Bundesländern leicht abweichendes Verhalten. Wenngleich (nur) 62,4 % der Gesamtkapazitäten Bayerns aus Neuinstallationen nach 2009 hervorgehen, wurden rund 90 % der Gesamtkapazitäten nach 2005 installiert. Die Divergenz des Alters des Gros der kumulierten Kapazitäten Bayerns und der anderen fünf Bundesländer der Tabelle 4-6 stellt sich somit, bei einer angenommenen Lebensdauer eines PV-Moduls von 25 Jahren, als gering heraus.

Zu beachten bleibt jedoch, dass durch die große Menge der bayerischen Kapazitäten verglichen zu den Gesamtkapazitäten der betrachteten Region der zeitraumabhängige relative Anteil der installierten Gesamtkapazitäten aus Tabelle 4-6 durch das Gewicht der Installationen in Bayern bestimmt wird. Bayern stellte bis einschließlich 2009 stetig mehr als 80 % der Gesamtkapazitäten der sechs Bundesländer (mitunter sogar mehr als 90 %). Seit 2010 sinkt der bayerische Anteil kontinuierlich auf knapp 60 % im Jahr 2013. Exklusive Bayern beträgt der zeitraumabhängige relative Anteil der installierten Gesamtkapazitäten der übrigen fünf Bundesländer für die Installationen:

- nach 2008: 93,8 %,
- nach 2009: 87,7 %,
- nach 2010: 72,0 %,
- nach 2011: 43,3 % und
- nach 2012: 9,7 %.

Der Unterschied zwischen den eben angegebenen relativen Anteilen zu den Gesamtanteilen der Tabelle 4-6 macht das Gewicht der bayerischen Kapazitäten deutlich. Allerdings zeigt die Betrachtung auch, dass gerade in den Jahren 2010 bis 2012 das Gros der Gesamtkapazitäten von Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Brandenburg und Berlin neuinstalliert wurden. Eine differenziertere Betrachtung der örtlichen Verteilungen der installierten Kapazitäten ist nur für Neuinstallationen nach 2009 möglich. Grund hierfür ist die mit dem Inkrafttreten der EEG-Novelle von 2009 einhergehende Melde-

pflicht für Neuinstallationen. Wenngleich sich die Datenverfügbarkeit und -konsistenz für die Lokalisierung der Neuinstallationen vor 2009 als ungenügend erweist, kann dies mit Hilfe des EEG-Anlagenregisters ab 2009 bis auf Postleitzahlenebene genau erfolgen.

Eine Ausnahme stellt die Dokumentation während des 1.000-Dächer-Programmes dar. Für den Zeitraum zwischen 1991 und Ende 1994 konnte eine, auf der exzellenten Datengrundlage basierende, Auswertung der Anlagenlokalisierung realisiert werden. Die entsprechenden Ergebnisse beispielsweise für den Freistaat Sachsen sind [Rindelhardt *et al.* 1995] zu entnehmen. Darin werden die zwei folgenden Beobachtungen bezüglich der Installationen infolge des 1.000-Dächer-Programmes deutlich:

- die Lokalisierung der Antragsteller korrelierte stark mit den Firmensitzen aktiver Fachfirmen (Installateure) und
- einige der Fachfirmen installierten größtenteils technisch identische PV-Anlagen, welche auf Paketangeboten von Modulherstellern basierten.

Die folgende Abbildung 4-12 zeigt als ein Resultat der Datenaufbereitung die geographische Verteilung der während des 1.000-Dächer-Programmes installierten 150 PV-Anlagen in Sachsen.

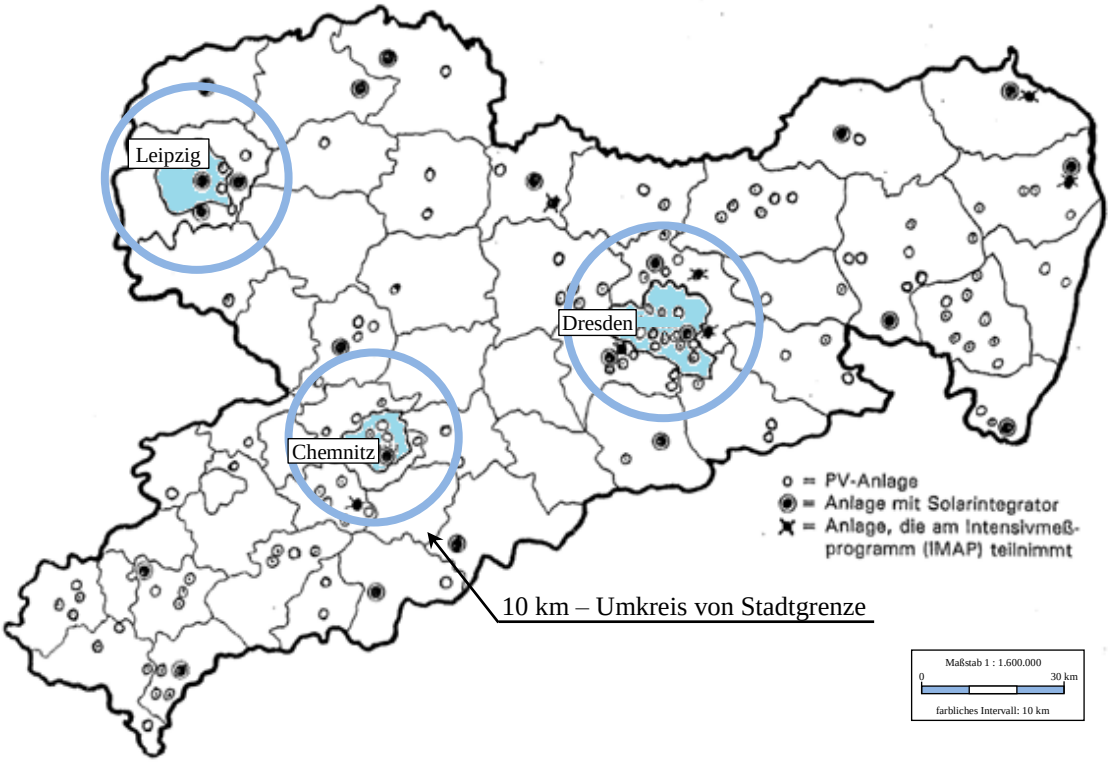


Abbildung 4-12: Geographische Verteilung der infolge des 1.000-Dächer-Programmes installierten 150 sächsischen PV-Anlagen. Abbildung nach [Rindelhardt *et al.* 1995].

Der Abbildung 4-12 ist zu entnehmen, dass sich die sächsischen Installationen im benannten Zeitraum einerseits auf die drei Städte Dresden, Chemnitz und Leipzig sowie deren näheren Umgebung (10 km Umkreis) konzentrierten, andererseits jedoch starke Unterschiede in der installierten Anlagenzahl zwischen den drei Direktionsbezirken Dresden, Leipzig und Chemnitz bestanden. Im Gegensatz dazu zeigt die Lokalisierung der Neuinstallationen seit 2009 allerdings ein konträres Verhalten zu den Installationen im Zeitraum zwischen 1991 und Ende 1994 sowohl bezüglich der Aggregation in den drei benannten Städten und deren näheren Umgebung, als auch im Installationsverhalten der drei sächsischen Direktionsbezirke untereinander auf. Von 2009 bis 2013 wurden beispielsweise jährlich (gemittelter Wert) mehr als doppelt so viele Anlagen im gesamten Direktionsbezirk Leipzig als in der Kreisfreien Stadt Leipzig selbst samt näherer Umgebung (rund 10 km) installiert. Ähnlich stellt sich die Situation in den Direktionsbezirken Chemnitz und Dresden dar. Während im Direktionsbezirk Chemnitz zwischen 2009 und 2013 rund die 2,5-fache Installationsmenge verglichen zur Anzahl der Installationen in der Stadt Chemnitz und der näheren Umgebung installiert wurde, stieg dieses Verhältnis für den Direktionsbezirk Dresden auf mehr als das 3,5-fache an. Wenngleich die Gründe dafür mannigfaltig und nicht in der Gesamtheit zu erfassen sind sowie Schnittmengen und gegenseitige Wechselwirkungen vorausgesetzt werden müssen, kann von nachfolgenden Einflussfaktoren und Erklärungsansätzen ausgegangen werden[37]:

- höhere Anzahl verfügbarer Installateure auch in den ländlichen Regionen,
- bessere Infrastrukturen und qualitativ hochwertigere Logistik für den Transport auch in abgelegene Regionen,
- wesentlich höherer Anteil zur Verfügung stehender Flächen außerhalb der drei kreisfreien Städte samt näherer Umgebung,
- mehr Dachfläche pro Kopf außerhalb der drei kreisfreien Städte samt näherer Umgebung,
- höhere Vielfalt der angebotenen Module und damit leichterer Zugang zu möglicherweise benötigten Speziallösungen,
- leichterer Informationszugang auch außerhalb der Städte,
- Veränderung der Einkommens- und Altersstrukturen sowie
- Wandel im ökologischen Bewusstsein.

[37] Die Auflistung stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Reihenfolge der Stichpunkte stellt keine Gewichtung dar.

Zur weiteren Diskussion finden sich die wichtigsten Kennzahlen aus der Auswertung der PV-Meldezahlen der Bundesnetzagentur für Sachsen in nachstehender Tabelle 4-7 zusammengefasst. Die Betrachtung der absolut jährlich installierten Anlagenanzahl lässt folgende Rückschlüsse zu. Der gesamte Direktionsbezirk Leipzig bleibt zwar bei den absoluten Anzahlen der jährlich installierten Photovoltaikanlagen weiterhin hinter den anderen beiden Direktionsbezirken zurück, verglichen zu den Installationen infolge des 1.000-Dächer-Programmes (vgl. Abbildung 4-12) jedoch in einem wesentlich geringerem Ausmaß. Der zusätzliche Einbezug des Flächenkriteriums zeigt, dass der Direktionsbezirk Leipzig seit 2009 die meisten Analageninstallationen je km² stellt, woraus die höchste Anlagendichte in den drei sächsischen Direktionsbezirken resultiert.

Tabelle 4-7: Vergleich der jährlich neuinstallierten Kapazitäten in MW_p und Anlagenanzahlen der drei sächsischen Direktionsbezirke von 2009 bis 2013.

		Region								
		Leipzig			**Dresden**			**Chemnitz**		
		Stadt	**Stadt + Umland (10 km)**	**Direktionsbezirk**	**Stadt**	**Stadt + Umland (10 km)**	**Direktionsbezirk**	**Stadt**	**Stadt + Umland (10 km)**	**Direktionsbezirk**
Neu instal. Kapazität im Jahr in MW_p	**2009**	1,45	11,53	26,08	1,64	5,22	57,75	2,22	6,47	25,35
	2010	8,25	18,38	78,53	4,21	9,91	88,25	5,79	22,32	71,51
	2011	18,51	60,21	135,83	6,42	25,17	154,19	4,09	26,52	71,17
	2012	8,49	79,49	163,65	2,87	12,81	190,56	9,48	37,81	93,54
	2013	2,31	28,15	47,33	1,28	8,73	66,49	0,94	8,61	29,42
Neu installierte Anlagenzahl im Jahr	**2009**	120	286	842	114	253	1.317	79	261	951
	2010	190	384	1.345	197	400	1.934	135	442	1.663
	2011	238	460	1.496	191	494	2.076	144	483	1.711
	2012	214	402	1.320	145	352	1.642	121	453	1.559
	2013	185	324	891	109	242	952	99	350	1.197

Laut [BSW-Solar 2014b] betrug die Durchschnittsgröße neu installierter PV-Anlagen in Sachsen im Jahr 2013 circa 45,4 kW_p. Damit liegt Sachsen bei dieser Kennzahl weit über dem bundesweiten Durchschnitt von 26,6 kW_p. Aus den Daten der Tabelle 4-7 geht ein atypisches Verhalten der Region Leipzig samt näherer Umgebung für 2012 hervor. Dessen durchschnittlich installierte Anlagengröße betrug 2012 rein rechnerisch 197,73 kW_p

und stellte damit ein Rekordhoch für den sächsischen Raum. Daraus lässt sich jedoch keineswegs schlussfolgern, dass alle installierten Anlagen in diesem Jahr größere Kapazitäten aufwiesen. Vielmehr wird diese Kennzahl durch das Gewicht einiger großer Anlageninstallationen, die sich auf die Stadt Leipzig samt einem Umkreis von 10 km konzentrierten, bestimmt. Zur Übersicht sind in der folgenden Tabelle 4-8 alle im Jahr 2012 neu installierten Anlagen mit einer Kapazität von mehr als 1 MW_p für die Stadt Leipzig samt 10 km Umland zusammengetragen. Bei solch leistungsstarken Anlagen handelt es sich nahezu ausschließlich um Freiflächenanlagen. Die Daten stammen aus dem öffentlich zugänglichen EEG-Anlagenregister, bereitgestellt von der Bundesnetzagentur.

Tabelle 4-8: 2012 neu installierte Photovoltaikanlagen in der Stadt Leipzig samt 10 km Umland mit einer Einzelkapazität von mehr als 1 MW_p.

		Lokalisierung		**installierte Kapazität in kW_p**
		Postleitzahl	**Ort**	
Eingangsdatum	**22.06.2012**	04509	Delitzsch	17.559,36
	31.10.2012	04838	Eilenburg	6.538,56
	28.06.2012	04683	Naunhof	6.110,40
	02.07.2012	04425	Taucha	5.247,55
	02.07.2012	04435	Schkeuditz	4.787,04
	25.06.2012	04519	Rackwitz	4.210,08
	29.11.2012	04288	Leipzig	2.639,05
	13.04.2012	04158	Leipzig	2.136,96
	02.07.2012	04460	Kitzen	1.800,00
	06.07.2012	04249	Leipzig	1.113,75
				Σ = 52.142,75

Die Diskussion zeigt, dass eine alleinige Betrachtung der Kennzahl „durchschnittlich neuinstallierte Anlagengröße“ keine gezielten Rückschlüsse auf die Installationen eines definierten Zeitraumes zulässt, sie kann vielmehr einer schnellen Identifikation der Häufung von Großanlageninstallationen dienen. Wenngleich 65,6 % der 2012 installierten Kapazitäten in Leipzig und 10 km Umgebung aus Anlagen einer Gesamtkapazität von mehr als 1 MW_p stammen, stellen diese in toto bei der Analagenanzahl, als auch bei den kumuliert installierten Kapazitäten die Minderheit dar.

Wie ist es nun aber um die zukünftige Entwicklung der betrachteten Region bestellt? Diese ist neben individuellen Entscheidungspräferenzen vor allem von der nationalen Gesamtausrichtung abhängig. Wenngleich in den kommenden Jahren von einem verhaltenem Auftreten des deutschen Marktes für jährliche Neuinstallationen (verglichen zu anderen nationalen Märkten und zur deutschen Markthistorie) ob Ausbaukorridoren und EEG-Reform ausgegangen werden kann, kann es derweilen auf Bundeslandebene oder in kleineren Regionen zu sprunghaften und imponderablen Kapazitätszuwächsen kommen. Die nationale Ausrichtung kann dabei nur Tendenzen einzelner Regionen prägen. Weiter lässt sich auch keine stichfeste Prognose über den zukünftigen Verteilungsschlüssel der zu installierenden Kapazitäten abgeben. Obwohl laut [Ammon *et al.* 2013] die absoluten Anteile der Solarstromerzeugung an der Bruttostromerzeugung für Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Brandenburg bis 2020 steigen sollen, bleiben sie auch in Zukunft weit hinter der erneuerbaren Energie aus Windkraft zurück. Neben der Windkraft steht die Photovoltaik besonders in Sachsen mit der Stromerzeugung aus Braunkohle in Konkurrenz. Somit sind zukünftige regionale Installationsraten für Photovoltaikanlagen neben nationalen Beschränkungen auch von regionalen Restriktionen abhängig.

Durch die nationale Beschränkung des jährlichen Zubaukorridors auf 2,5 GW_p und den damit verbundenen Mechanismen gehen etwaige Prognosen von sinkenden jährlichen Neuinstallationen für alle Bundesländer der betrachteten Region aus. [Ammon *et al.* 2013] geht in der Analyse von Hemmnis- und Erfolgsfaktoren für den ostdeutschen Raum noch einen Schritt weiter. Als Ergebnisse der darin getroffenen SWOT-Analyse wird besonders der Mangel an verfügbarem Kapital in Verbindung mit dem demographischen Wandel als Hemmnisfaktor benannt. So heißt es: „Demnach ist die finanzielle Beteiligung privater Haushalte an Projekten im Vergleich zu den westdeutschen Bundesländern sehr gering, was die Akzeptanz erheblich schmälert. Die gesellschaftliche Akzeptanz stellt allerdings einen wesentlichen Erfolgsfaktor dar […]“ [Ammon *et al.* 2013, Seite 121]. Eine gesonderte Rolle wird dem Netzausbau zugeschrieben. Er wurde als zentraler Flaschenhals identifiziert. In welchem Maße die angegebenen Faktoren jedoch gezielt den Zubau von Photovoltaikanlagen beeinflussen, lässt sich nicht beantworten. Fakt ist, dass nicht einzelne, sondern eine Vielzahl an Faktoren, die sich zudem gegenseitig unterschiedlich stark beeinflussen, auf regionale Zubauraten wirken. Eine mögliche Prognose regionaler Entwicklungen stellt sich somit als komplexes und

vielschichtiges Problem dar, weshalb kaum stichfeste Prädiktionen getroffen werden können. Für Sachsen samt Anrainer (deutsche Bundesländer) geht die Tendenz, wie bereits beschrieben, Richtung sinkender jährlicher Neuinstallationen in den kommenden Jahren. Obendrein bewirkt die im „Energie- und Klimaprogramm Sachsen 2012“ getroffene Fokussierung auf die Braunkohle keine positive Stimulanz der Prognosen für den sächsischen Raum.

Neben den Anrainern auf deutscher Seite grenzen auch polnische und tschechische Gebiete direkt an Sachsen. Polnische Anrainer sind die Woiwodschaft Lebus und die Woiwodschaft Niederschlesien. Da Polen nach wie vor kaum nennenswerte Neu-installationen aufweist und folglich eine im europäischen Vergleich sehr geringe kumulierte Kapazität besitzt (vgl. Abbildung 4-5, Seite 165) stellt sich auch die absolute Anlagenzahl in den benannten polnischen Regionen vernachlässigbar klein dar. Anders sieht die Situation in den angrenzenden tschechischen Regionen aus. Wie im Kapitel 4.2.2: „Europäische Erhebungen“ geschildert, kam es in Tschechien besonders in den Jahren 2009 und 2010 zu sprunghaften Kapazitätszuwächsen. Fast die gesamte kumulierte Kapazität wurde in den beiden Jahren installiert. Danach flachten die jährlichen Neuinstallationen auf ein niedriges Niveau ab (2013: 88 MW_p). In Zukunft ist nicht mit einem wesentlichen Anstieg von Neuinstallationen, auch aufgrund des Erreichens der im NREAP definierten Ziele, zu rechnen. Ähnlich den verfügbaren Informationen bezüglich der installierten Kapazitäten in Deutschland vor 2009 sind kaum Daten über die absolut kumulierten Kapazitäten und die jährlichen Installationen hinaus für Tschechien vorhanden. Die tschechische Agentur für erneuerbare Energien gibt lediglich für 2009 einen Verteilungsschlüssel der bis dato installierten Kapazitäten an. Demnach waren 2009 rund 7,7 % der tschechischen Gesamtkapazitäten in den drei direkt an Sachsen angrenzenden Regionen Reichenberg, Aussig und Karlsbad installiert. Wird der Einzugsradius auf tschechischer Seite bis auf die gleiche Entfernung wie die der äußeren Grenze Thüringens zu Sachsen erhöht, sprich werden die tschechischen Regionen Pilsen, Prag und Mittelböhmen mit in die Betrachtung einbezogen, waren 2009 rund 29 % der tschechischen Gesamtkapazitäten dortzulande installiert; wobei rund 12,27 % allein auf die Region Pilsen entfielen. Über den derzeitigen Anlagenbestand, deren Lokalisierung und die regionale Installationshistorie lässt sich indessen ob der mauen Datenlage keine Aussage treffen. Weiter lässt sich nicht nachvollziehen, ob und in welcher Stärke sich der für 2009 bekannte Verteilungsschlüssel verändert hat. Würde

dieser jedoch auf die im Jahr 2013 installierte Gesamtkapazität (2,2 GW_p: vgl. Tabelle 4-3, Seite 161) angewendet, währen rund 640 MW_p in der betrachteten Region installiert. Diese Angabe stellt allerdings nur eine Annahme dar. Gesichert ist jedoch die Angabe der regional installierten Kapazitäten von der Tschechischen Agentur für erneuerbare Energien (kurz: Czech RE Agency) für das Jahr 2009, wonach im benannten Gebiet rund 132,8 MW_p installiert waren; dabei entfielen rund 56,8 MW_p auf die Region Pilsen. Wie bereits mehrfach geschildert, besteht das Gros des tschechischen Anlagenparks aus Neuinstallationen der Jahre 2009 und 2010. Laut der Statistiken von [EurObserv'ER 2014] stammen so über 86,5% der tschechischen Gesamtkapazitäten aus den Neuinstallationen der beiden betreffenden Jahre; im Jahr 2009 wurden rund 408,6 MW_p und 2010 circa 1.495,8 MW_p installiert.

Die nachstehende Abbildung 4-13 zeigt zusammenfassend die für die regionale Betrachtung relevanten Gebiete Sachsen samt deutscher und tschechischer Anrainer sowie Berlin, Pilsen, Prag und Mittelböhmen.

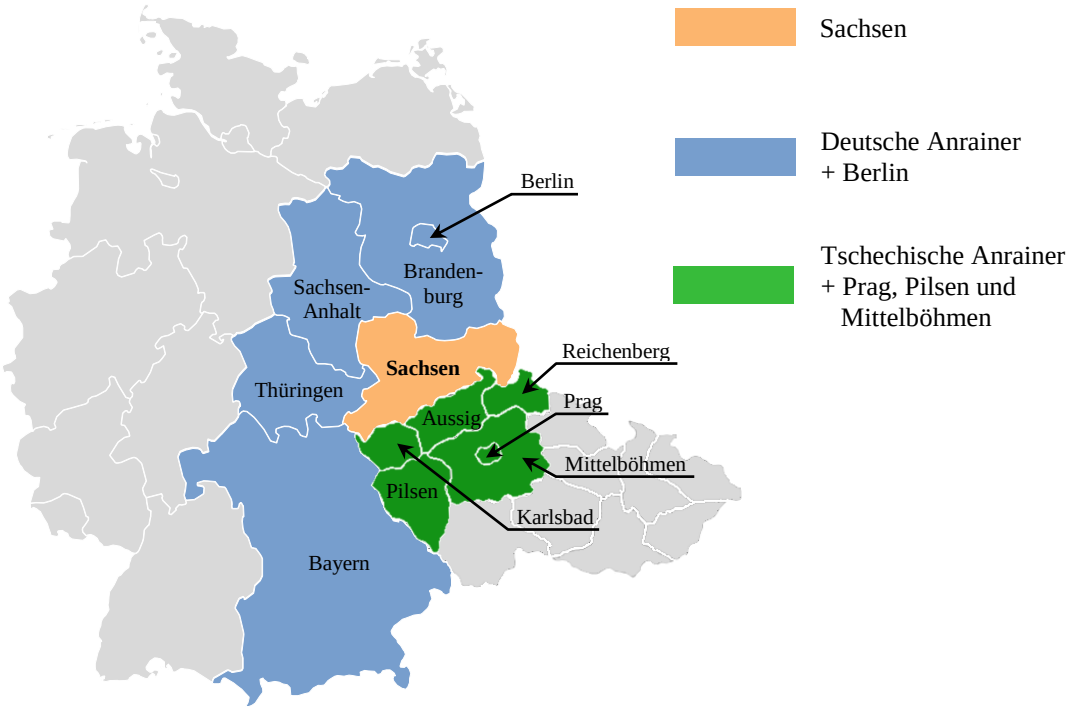


Abbildung 4-13: Darstellung der für die regionale Betrachtung relevanten Gebiete.

Wenngleich [Bechnik 2010] nur die Verteilung der kumulierten Kapazitäten sowie den Anlagenbestand Tschechiens für Ende 2009 angibt, kann die Annahme getroffen werden, dass der gegebene Verteilungsschlüssel auch auf die neu installierten Kapazitäten des

Jahres 2009 angewendet werden kann, da diese rund 88,3 % der bis dato installierten Gesamtkapazität ausmachen. Diese Annahme gilt analog für die Anzahl der tschechischen Anlageninstallationen des Jahres 2009. Die folgende Tabelle 4-9 fasst abschließend die jährlichen Neuinstallationen und die jährlich neuinstallierte Anlagenzahl von 2009 bis 2013 für die in der Abbildung 4-13 hervorgehobene Region zusammen. Dabei bleibt zu beachten, dass die entsprechenden Werte für die tschechischen Regionen lediglich für 2009 in gewissen Fehlergrenzen berechnet werden konnten. Für die Jahre 2010 bis 2013 fehlen adäquate Quellen. Mit Hinsicht auf den kumulierten Anlagenbestand und die verfügbaren Kapazitäten der Gesamtregion fehlen damit die tschechischen Beiträge. Für 2013 kann in den sechs tschechischen Regionen jedoch von 500 bis 800 MW_p kumulierter Kapazität und einem Anlagenbestand von schätzungsweise 10.000 bis 16.000 Einzelanlagen ausgegangen werden.

Tabelle 4-9: Jährliche Neuinstallationen in MW_p und Stück der betrachteten Region für den Zeitraum 2009 bis 2013 sowie Angabe der kumulierten Kapazitäten und der Anlagenzahl Stand 2013. Daten nach EEG-Anlagenregister und [BDEW 2014].

Region	Neu installierte Kapazität im jeweiligen Jahr in MW_p					Kumulierte Kapazität 2013	Neu installierte Anlagenzahl im jeweiligen Jahr in Stück					Gesamtbestand 2013
	2009	2010	2011	2012	2013		2009	2010	2011	2012	2013	
Sachsen	109,4	238,6	361,4	447,9	149,4	1.487	3.119	4.962	5.301	4.532	3.288	30.235
Berlin	8,9	11,9	14,4	15,4	6,1	67	482	688	874	764	549	5240
Bayern	1.485	2.430	1.744	1.513	902	10.526	57.113	80.067	73.837	52.350	33.798	467.565
Brandenburg	172	342	982	971	185	2.776	2.949	4.531	5.122	4.769	3.681	27.143
Sachsen-Anhalt	82,1	227	448	573	197	1.668	1.729	3.384	3.809	4.211	3.081	21.372
Thüringen	58,4	137	222	366	144	1.059	1.863	3.273	3.838	3.612	3.201	22.102
Summe	1.806	3.148	3.411	3.438	1.434	16.096	64.136	91.943	87.480	65.706	44.310	543.422
Aussig	24,7[a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	308[a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	??
Karlsbad	3,8[a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	114[a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	??
Mittelböhmen	34,3[a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	551[a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	??
Pilsen	50,1[a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1.004[a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	??
Prag	1,3[a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	153[a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	??
Reichenberg	3,1[a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	153[a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	??
Summe	117	-	-	-	-	500-800[b]	2.283	-	-	-	-	10.000-16.000[b]
Gesamtregion[c]	1.915	3.387	3.773	3.886	1.583	17.583	67.255	96.905	92.781	70.238	47.598	573.657

Der Vergleich der Summen der kumulierten Kapazitäten und des Anlagenbestandes im Jahr 2013 der sächsischen Anrainergebiete (deutsche und tschechische Seite) zeigt einen vernachlässigbar geringen Anteil der tschechischen Beiträge. Exemplarisch macht der Anlagenbestand der sechs tschechischen Regionen in Summe (10.000 bis 16.000 Anlagen) maximal 3 % des Anlagenbestandes der sächsischen Anrainergebiete auf deutscher Seite aus. Weiter stellt die Angabe der kumulierten Kapazitäten und des Anlagenbestandes im Jahr 2013 als Summe der sechs tschechischen Gebiete eine Schätzung dar, was eine hohe Fehlerwahrscheinlichkeit birgt. Aus diesen beiden Gründen (vernachlässigbarer Beitrag und hoher Fehlerbereich) erfolgt die Summenbildung der kumulierten und jährlich neuinstallierten Kapazitäten sowie der Anlagen-anzahl für die Gesamtregion in der Tabelle 4-9 unter Absenz der tschechischen Beiträge.

Der Tabelle 4-9 ist zu entnehmen, dass Stand 31.12.2013 in Sachsen samt der deutschseitigen Anrainer sowie in Berlin zusammen 573.657 Einzelanlagen verortet waren, wobei 30.235 Anlagen auf Sachsen entfielen. Dieser Anlagengesamtbestand besitzt eine kumulierte Kapazität von knapp 17,6 GW_p. Die sich daraus ergebende durchschnittliche Anlagengröße von 30,65 kW_p deutet auf einen hohen Anteil kleinerer Dachanlagen hin. Von den 573.657 Einzelanlagen in der diskutierten Region stammen 81,5 % aus Bayern, gefolgt von Sachsen (5,27 %) und Brandenburg (4,73 %). Wie bereits in der Tabelle 4-6 auf Seite 181 und der sich daran anschließenden Diskussion dargestellt, stammt das Gros des Anlagenbestandes der Gesamtregion aus Neuinstallationen nach 2009. Somit kann davon ausgegangen werden, dass es in naher Zukunft nicht zu einem Beitrag der jährlichen Neuinstallationen ob Substitution von Altanlagen oder Repowering in der gesamten Region kommen wird.

4.2.5 Zusammenfassung der Marktentwicklung

Nach Jahren des Wachstums verändert sich der geographische Fokus des globalen Marktes. Laut [Weber 2014] ist bis 2020 mit einem weltweiten Marktvolumen der jährlichen Neuinstallationen von mehr als 100 GW_p je Jahr zu rechnen. Weiter wird spätestens 2050 von rund 3.000 GW_p global kumulierter Kapazitäten ausgegangen. Um 10 % des internationalen Energiebedarfs durch photovoltaische Systeme zu decken, werden derzeit schätzungsweise 10.000 GW_p kumulierter Kapazitäten benötigt. Die dafür notwendigen Produktionskapazitäten folgen dabei der beschriebenen globalen Marktverschiebung. Dementsprechend werden zwangsläufig auch die Stoffströme aus Produktionsabfällen steigen, jedoch örtlich mit der Lage der zukünftigen Topmärkte korreliert. Wie im Kapitel 4.2.1: „Globale Betrachtungen“ beschrieben, schrumpft seit Begin des Jahres 2012 der europäische Markt bei steigenden globalen Beiträgen von Märkten aus China, Japan und Staaten aus dem Sonnengürtel. Wenngleich sich auf europäischer Ebene ein Aufstreben des großbritannischen Marktes abzeichnet, schrumpfen andere europäische Topmärkte wie Deutschland und Italien. Speziell für den deutschen Markt ist in naher Zukunft nicht mit einem Wachstum ob der anstehenden EEG-Reform und der Senkung des Zubaukorridors auf jährlich 2,5 GW_p zu rechnen. Ungewiss und imponderabel stellt sich auch die weiter entfernte zukünftige Entwicklung des deutschen Marktes dar, da Unklarheit darüber herrscht, was nach Erreichen des im NREAP definierten Ausbauziels von 52 GW_p folgt. Mit steigender Regionalisierung der Betrachtungsebene wächst die Imponderabilität dabei nicht nur hinsichtlich der jährlichen Zubauraten, sie gipfelt viel mehr in der Frage nach deren regionalen Verteilung.

Da der regionale Markt, Sachsen samt deutschseitiger Anrainer, an den nationalen Markt und dessen Rahmenbedingungen gekoppelt ist, ist auch auf dieser Ebene vom Stagnieren auf dem derzeitigen Niveau auszugehen. Indes sind auch weiterhin einzelne, nicht vorhersehbare und sprunghafte Installationen regional möglich. Speziell für Sachsen gehen die Prädiktionen aber in toto von einem sinkenden Markt ob der Fokussierung auf Braunkohle aus.

Wie die regionalen Betrachtungen (Kapitel 4.2.4) gezeigt haben, tragen die Installationen der polnischen und tschechischen Anrainer nur mit vernachlässigbar kleinen Werten zum hiesigen Anlagenbestand bei. Sowohl in Polen, als auch in Tschechien (mit Erreichen des im NREAP definierten Ausbauziels) ist nicht mit einem Marktwachstum zu rechnen. Bei

der Diskussion stellte sich weiter heraus, dass der gesamte Anlagenpark von Sachsen samt seiner deutschseitigen Anrainer Ende 2013 aus 573.657 Einzelanlagen besteht, deren Gros nach 2009 installiert wurde.

Ein Fazit auch aus der regionalen Betrachtung ist daher, dass in naher Zukunft kaum mit Abfallströmen aus Altanlagen oder Repoweringmaßnahmen zu rechnen ist. Hauptquelle für ein mögliches Recycling bleiben neben Produktionsabfällen (regional sinkend durch globale Marktverschiebung und damit einhergehender Verlagerung der Produktion aus Deutschland und Europa) weiterhin Abfallströme aus Transport- und Installationsschäden sowie Garantiefällen, wobei beide Gruppen wiederum mit der Entwicklung des Marktes für Neuinstallationen korrelieren und folglich in naher Zukunft auf dem Niveau von 2013 verbleiben oder weiter sinken. Da das Gros der geringen tschechischen Anlagenbestände aus den sprunghaften Zubauten von 2009 und 2010 stammt (86,5 % der kumulierten Kapazitäten), kann bei einer möglichen Abfallprognose für Sachsen samt Anrainern nur von einem idealisierten Beitrag in Form eines Dirac-Impulses im Zeitraum nach 2035 ausgegangen werden.

Mit Fokus auf Sachsen zeigte sich, dass es im Laufe der letzten 20 Jahre zu einer Verschiebung der Neuinstallationen hin in die ländlichen Gegenden kam und der Direktionsbezirk Leipzig über die höchste Anlagendichte im sächsischen Raum verfügt. Die Betrachtung der regionalen Entwicklungen macht deutlich, dass ein Anlagenbestandskataster oder eine erweiterte Datenakquise im Zuge der Meldepflicht für Neuanlagen sich positiv auswirken würden. Neben einer genaueren Lokalisierung der Anlagen wäre eine anlagenspezifische Zuordnung des jeweiligen Alters ein Vorteil. Wesentlich gewichtiger wäre jedoch eine Ausweitung der Anlageninformation (sowohl in Form eines Bestandskatasters, als auch in der jetzigen Art und Weise) auf die installierte Zellen- und Modultechnologie.

4.3 Anteile der Technologien

Bei der Betrachtung des regionalen Anlagenbestandes wurde nicht zwischen den verschiedenen Photovoltaiktechnologien differenziert. Wie bereits im Kapitel 3: „Solarzellentechnologien“ detailliert geschildert, unterscheiden sich die einzelnen Zellenkonzepte jedoch stark in ihrem Aufbau und der verwendeten Rohstoffe. Eine Trennung des regionalen Anlagenbestandes nach den jeweiligen Technologien ist daher sowohl für die Betrachtung der Produktions- und Recyclingprozesse als auch für die Ermittlung der spezifischen Abfallstoffströme von Altmodulen unerlässlich. Dies ist jedoch ob der schlechten Datenlage nur begrenzt möglich und kann sonach zu erhöhten Abweichungen der berechneten Mengen zum tatsächlichen Istbestand führen.

Wenngleich in der Literatur eine Einteilung der Technologien nach „Generationen“ dominiert, soll die bereits im Kapitel 3.2: „Überblick der verschiedenen Technologien“, Seite 85 eingeführte Abbildung 3-3 die Grundlage für die Klassifizierung der unterschiedlichen Zellentechnologien darstellen. Darin wird zwischen den drei übergeordneten Solarzellentechnologieklassen:

- kristalline Siliziumzellen,
- Dünnschichtzellen und
- sonstige Konzepte

unterschieden, welche in den tieferen Ebenen weiter differenziert werden. Selbige Grobgliederung der Technologien soll nun auch beim Einstieg in die folgenden Untersuchungen bezüglich der Anteile der unterschiedlichen installierten Zellentechnologien am regionalen Istbestand und an deren zeitraumabhängiger Lokalisierung Anwendung finden.

Wie eingangs erwähnt, stellt sich jedoch die Datenverfügbarkeit und deren Qualität für eine detaillierte regionale Untersuchung der Technologieanteile als unbefriedigend dar. Adäquate Angaben zu den regionalen oder nationalen Anteilen der verschiedenen Technologien sind sowohl in der Literatur, als auch bei der Bundesnetzagentur, verschiedenen Forschungseinrichtungen und den deutschen Solarverbänden nicht existent oder unbekannt. Allenfalls können persönliche Einschätzungen von Experten erste Ansätze für die Anteile der Technologien am nationalen und regionalen Istbestand liefern. Herr Oskar Wolf (DGS Franken) beispielsweise schätz den Anteil der kristallinen Siliziumtechnologie am bundesweiten Anlagenistbestand mit weit über 90 % ein. Der

Dünnschichttechnologie werden dabei Anteile von 4 bis 7 % zugeschrieben; den sonstigen Konzepten vernachlässigbar kleine Anteile. [Wolf 2014] Weiter lässt sich ebenfalls keine repräsentative Aussage über die Befragung verschiedenster Installateure oder Händler generieren, da sowohl keine Vollständigkeit garantiert werden kann, als auch keine Homogenität vorliegt. Bei verschiedenen Installateuren beispielsweise bestehen unterschiedliche Präferenzen gegenüber den Technologien. So installieren, beziehungsweise handeln einige ausschließlich, andere wiederum bevorzugt mit kristallinen Siliziumsolarmodulen et cetera. Zur Berechnung der regionalen Technologieanteile bleibt nur eine Hochrechnung internationaler Statistiken zu den Marktanteilen der Technologien in Verbindung mit der bereits beschriebenen zeitraumabhängigen Verortung regional installierter Kapazitäten. Für die Datenerhebung stehen wenige international gültige Statistiken zur Verfügung, welche als Basis mehrenteils die Technologieanteile infolge der globalen Produktionszahlen besitzen. Somit müssen für die nachstehenden Betrachtungen zwei Annahmen getroffen werden:

1. Homogene Verteilung der Technologieanteile: Die globalen Statistiken gelten auch regional. Es gibt keine regionalen Besonderheiten, Spitzen oder Ähnliches.
2. Die Statistiken zu den prozentualen Anteilen der verschiedenen Zellentechnologien auf Basis der Produktionszahlen gelten in gleichem Maße für die Zellentechnologieanteile bei den installierten Kapazitäten.

Die Struktur des globalen Photovoltaikmodulmarktes hinsichtlich der Machtverteilung fluktuiert seit 1990 bis heute. Dabei stellte er sich anfänglich als Verkäufermarkt, seit 2009 durch den rasanten Produktionsanstieg in China als Käufermarkt dar. Gegenwärtig wandelt sich der globale Photovoltaikmodulmarkt wieder zu einem Verkäufermarkt, da die bereits im Kapitel 4.2.1: „Globale Betrachtungen“ ab Seite 157 beschriebene Schwächung der globalen Nachfrage eine Senkung des Angebots zur Folge hatte. Die nun wieder steigende Nachfrage, vor allem in Nationen, die momentan nicht die globalen Topmärkte stellen, wird so durch das begrenzte Angebot determiniert [Sieg 2014].

Die Charakteristik eines Verkäufermarktes äußert sich darin, dass die Nachfrage das Angebot übersteigt, wodurch der Verkäufer eine stärkere Stellung als der Käufer besitzt. [Bartels 2012, S. 2] gibt eine weitreichendere Definition des Begriffs an: „Der Begriff *Verkäufermarkt* beschreibt eine Marktsituation, in der Vertragsbedingungen, Preisnachlässe, Zahlungsbedingungen oder Lieferbedingungen durch den Verkäufer bzw. die von ihm vertretene Organisation festgelegt werden.“

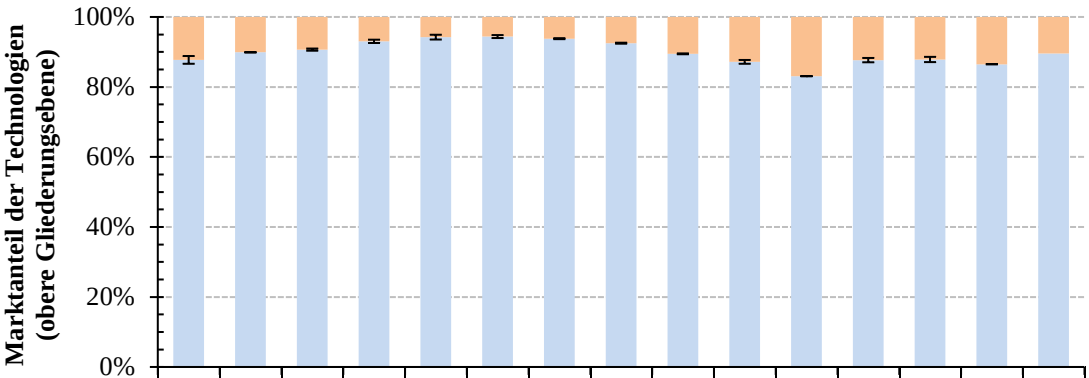
Besonders hinsichtlich der Liefer- und Vertragsbedingungen können für den Zeitraum von 1990 bis 2009, als der globale Photovoltaikmodulmarkt die Charakteristik eines Verkäufermarktes besaß, die Statistiken zu den prozentualen Zellentechnologieanteilen auf Basis der Produktionszahlen im Sinne der zweiten Annahme auf die installierten Kapazitäten übertragen werden. Zwischen 2009 und 2014, als sich der globale Photovoltaikmodulmarkt als Käufermarkt darstellte, können die produktionsbasierten Statistiken ebenfalls genutzt werden, da die Produktion der PV-Module keine Lagerproduktion darstellt. Die Produzenten passen ihre Produktion durch Marktanalysen und Prognosen den Technologiepräferenzen am Markt ständig entsprechend an. Dies wird auch durch [Rothe 2014] bestätigt, der für diesen Zeitraum von einem Organisationsprinzip ähnlich der bedarfssynchronen Produktion spricht, wobei eine geringe Vorproduktion eben auf Basis von Marktprognosen erfolgt. Folglich bestimmt selbst zu Zeiten des Käufermarktes die Nachfrage das Technologieangebot, wodurch die produzierten Technologieanteile nahezu den installierten Technologieanteilen gleichen. Sonach kann die zweite Annahme für den gesamten Zeitraum von 1990 bis heute bestätigt der weiteren Untersuchung zugrunde gelegt werden. Weiter stellen sich die Technologieanteile der installierten Kapazitäten vor 1999 für die regionale Betrachtung als irrelevant dar, da die bis dato installierten Kapazitäten vernachlässigbar klein ausfallen[38] (vgl.: Kapitel 4.2.3: „Besonderheiten des deutschen Marktes“ ab Seite 168).

Laut [Neuhaus 2014] und [Four Peaks Technologies 2014] besitzen die kristallinen Siliziumtechnologien (mono-, multikristalline Siliziumzellen und Ribbonzellen) im Jahr 2013 einen Marktanteil von circa 90 %, was sich mit den Einschätzungen von [Wolf 2014] und [Rothe 2014] deckt. Der restliche Anteil entfällt entsprechend auf die Dünnschichttechnologien. Diese Dominanz der kristallinen Siliziumtechnologie zeigt sich nicht nur punktuell, sondern über den gesamten betrachtungsrelevanten Zeitraum. [Weber 2014] und [Hering 2011] beispielsweise geben zwischen 1999 und 2010 jährliche Anteile der kristallinen Siliziumtechnologie am Markt[39] von bis zu 95 % an.

[38] Die bis inklusive 1998 installierten bundesweiten Photovoltaikkapazitäten machen weniger als 0,1 % der heutigen Gesamtkapazitäten aus.

[39] Das Gros der Quellen setzt die Marktanteile der Technologien mit den Anteilen der jeweiligen Technologie an der globalen Gesamtproduktion gleich. Dies soll an dieser Stelle ingleichen gelten. Siehe auch 2. Annahme oben.

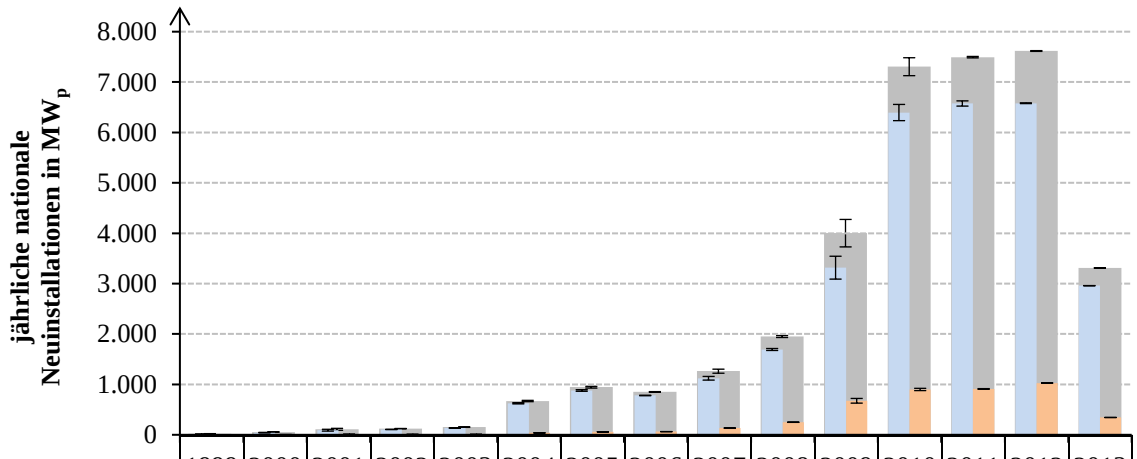
Einen detaillierten Überblick der jährlichen Technologieanteile am globalen Markt gibt die folgende Abbildung 4-14.



	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Kristallines Si	87,7	89,9	90,7	93,0	94,2	94,4	93,8	92,5	89,5	87,2	83,1	87,7	87,9	86,5	89,6
Dünnschicht	12,3	10,1	9,3	7,0	5,8	5,6	6,2	7,5	10,5	12,8	16,9	12,3	12,2	13,5	10,4

Abbildung 4-14: Technologieanteile von kristallinem Siliziumzellen und Dünnschichtzellen am Markt nach Jahren zwischen 1999 und 2012. Daten nach [Neuhaus 2014], [Weber 2014] und [Hering 2011].

Die statistische Abweichung der Daten liegt dabei mit maximal 1,1 % auf einem geringen Niveau. Abbildung 4-14 unterstreicht die Dominanz der kristallinen Siliziumtechnologie am Weltmarkt, welche zwischen 1999 und 2012 durchschnittlich circa 89,8 % Marktanteil besaß. Unter Beachtung der beiden eingangs getroffenen Annahmen lassen sich durch die Multiplikation des jährlichen nationalen Kapazitätszuwachses mit den jährlichen Marktanteilen der Technologien die Technologieanteile am nationalen Anlagenistbestandes berechnen, welche in der folgenden Abbildung 4-15 dargestellt sind.



	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Kristallines Si	10,7	42,5	91,6	106	135	625	879	780	1.123	1.693	3.317	6.396	6.575	6.580	2.959
Dünnschicht	1,5	4,8	9,4	7,9	8,3	37,1	58,1	63,2	132	249	675	900	909	1.027	344
Summe	12,2	47,3	101	114	143	662	937	844	1.255	1.942	3.992	7.295	7.485	7.607	3.303

Abbildung 4-15: Nationaler jährlicher Kapazitätszubau gesamt und nach Technologieanteil in MW_p zwischen 1999 und 2012.

Da sowohl der Multiplikator als auch der Multiplikand zur Berechnung des jährlichen technologiespezifischen Kapazitätszuwachses einer gewissen Unsicherheit unterliegen, wurde im Sinne der Fehlerfortpflanzung die relative und absolute Standardabweichung des Produktes für beide Technologienarten nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet und in Abbildung 4-15 mit dargestellt. Die teilweise hohen Standardabweichungen der Daten für den jährlichen nationalen Kapazitätszuwachs (besonders für die Jahre 1999 bis 2001) beeinflussen die Unsicherheiten des Produktes dabei wesentlich stärker als die geringen Standardabweichungen des Multiplikanden ($\leq 1{,}1$ %) und führen so zu hohen Fehlerbereichen speziell bei den jährlichen Kapazitätszuwächsen der kristallinen Siliziumtechnologie in den Jahren 1999 bis 2001 (1999: 25,8 %, 2000: 11,3 % und 2001: 17,5 %). Dies kann jedoch durch den geringen Beitrag zum kumulierten technologiespezifischen nationalen Istbestand vernachlässigt werden. Für alle anderen betrachteten Jahre liegt die berechnete Unsicherheit unter 3 %[40]; für die Dünnschichttechnologie sogar unter 0,4 %.

Die kommenden Jahre betreffend gehen Schätzungen verschiedenster Institutionen und Autoren zwar einheitlich von einem sinkenden Marktanteil der kristallinen Siliziumsolartechnologie aus, dies jedoch wesentlich stärker als es sich derzeit zu bewahrheiten scheint. So bescheinigten beispielsweise [De Moor *et al.* 2004], [SolarServer 2013], [Antal *et al.* 2011] und [Shahan 2013] der kristallinen Siliziumtechnologie bereits 2010 einen Anteil von (nur) noch rund 80 %, wobei den Dünnschichttechnologien der restliche Marktanteil zugesprochen wurde. Verglichen zu den tatsächlichen Marktanteilen liegt diese Einschätzung deutlich unter dem Istwert inklusive dessen Fehlerbereiches. Für 2015 stellen sich die Prognosen mit einem Marktanteil der kristallinen Siliziumtechnologie von rund 67 %[41] wesentlich gewagter dar. Diese Einschätzung scheint sich zum jetzigen Zeitpunkt nicht annähernd zu bestätigen. Vielmehr ist auch im Jahr 2015 und darüber hinaus weiter von einer anhaltenden Dominanz der kristallinen Siliziumtechnologie mit Marktanteilen von über 80 % auszugehen. Allerdings scheint sich die Annahme des Markteintrittes von den sonstigen Zellentechnologien wie beispielsweise organischen Zellen und Konzentratorsystemen zu bewahrheiten. Deren Marktanteile werden aber ob der Dominanz der kristallinen Siliziumtechnologie nicht über 3 % steigen [Antal *et al.*

[40] Ausnahme bildet das Jahr 2009 mit 5,6 % relativer Standardabweichung für die siliziumbasierte Technologie und 1,2 % für die Dünnschichttechnologien. Dies ist wiederum durch die vergleichsweise hohe Standardabweichung der neu installierten Kapazitäten im Jahr 2009 bedingt. (vgl. Abbildung 4-7, Kapitel 4.2.3)

[41] [SolarServer 2013] schätz den Marktanteil der kristallinen Siliziumtechnologie im Jahr 2015 auf 76 % und grenzt sich damit von den anderen Quellen ab. Gleichwohl erscheint auch diese Einschätzung als zu niedrig.

2011, Seite 26]. Für 2020 gehen die einzelnen Befinden erwartungsgemäß weiter auseinander. So schreiben die genannten Quellen der kristallinen Siliziumtechnologie für 2020 Marktanteile zwischen 60 und 50 % zu; [SolarServer 2013] geht sogar von mehr als einer Halbierung der Marktanteile zwischen 2015 und 2020 auf 36 % aus. Die restlichen Marktanteile entfallen auf die Dünnschichttechnologien und auf die sonstigen Zellenkonzepte, welche 2020 maximal 10 % Marktanteil besitzen sollen. Das größte relative Wachstum wird dabei einheitlich der CIGS-Dünnschichttechnologie zugeschrieben.

Dementgegen geht [Ruhl *et al.* 2008] von einem linearen Verlust der Marktanteile der kristallinen Siliziumtechnologie von jeweils 5 % in 5 Jahren, beginnend 2010 mit 71,07 %, aus. Dieses Modell scheint jedoch ebenfalls für die Prognose der zukünftigen technologiespezifischen Marktanteile als ungeeignet.

Der derzeitigen Marktentwicklung folgend, scheint sich eher eine fortlaufende Marktdominanz der kristallinen Siliziumtechnologie bis über das Jahr 2020 hinweg anzudeuten. Wie im Kapitel 3.3.5: „Betrachtungen zum Wirkungsgrad kristalliner Siliziumsolarzellen“ bereits dargestellt, befindet sich diese Technologie zwar bereits nahe seinem theoretischen Wirkungsgradlimit, dies jedoch nur bezogen auf Laborzellen. Bei deren kommerziellen Pendants ist die Steigerung der Wirkungsgrade bisweilen nicht abgeschlossen. Trotz fortschreitender Wirkungsgradsteigerungen der Dünnschichttechnologie, besonders im Falle der Stapelzellen, und neuerer Konzepte wie Perowskitzellen[42] oder organische Zellen stehen diese noch am Anfang ihrer Entwicklung. Genau wie bei der kristallinen Siliziumtechnologie sind hier die Wirkungsgradspitzen der Laborzellen mit wachsendem Verständnis über die Vorgänge in den Materialien im Sinne ökonomisch durchführbarer Produktionsprozesse auf ihre kommerziellen Ableger zu transferieren. Die Übertragung der Laborzellenkonzeptionen auf die kommerzielle Produktion stellt neben der Kostenreduktion einen entscheidenden Entwicklungsschlüssel der jeweiligen Technologie dar. Für den Übergang zur Massenfertigung unter kompetitiven Bedingungen zur kristallinen Siliziumtechnologie sind sonach neben signifikanten Forschungsfortschritten auch Fortschritte in der Produktionstechnologie und eine Marktetablierung zur Erzielung von Kostenvorteilen durch Skaleneffekte notwendig. Wie Abbildung 4-16 und der Übersicht im Anhang 4-3 zu entnehmen sind, besitzen beide Technologiepfade durchaus das Potenzial sowohl den Wirkungsgrad von kristallinen

[42] Perowskit ist eine chemische Verbindung aus Kalzium, Titan und Sauerstoff in Form von Kalziumtitanat ($CaTiO_3$).

Siliziumzellen zu übersteigen, als auch geringere Produktionskosten bei einer Massenfertigung aufzuweisen. Etwaige Schätzungen zur Erreichung dieser Ziele belaufen sich jedoch auf noch mindestens 20 Jahre. [Ginley *et al.* 2008]

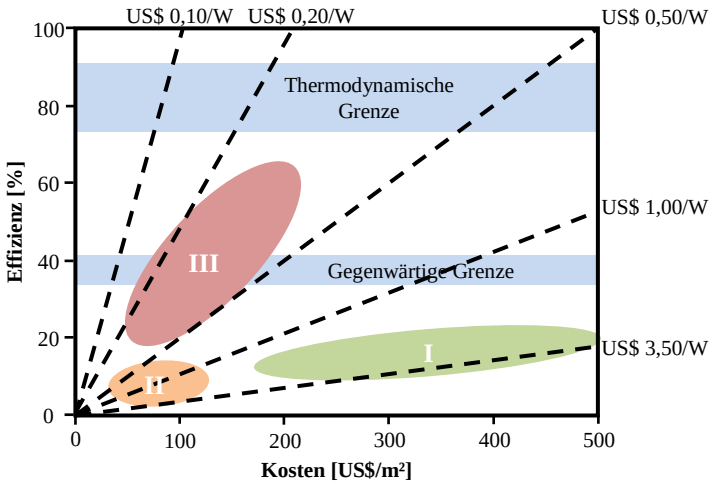


Abbildung 4-16: Analyse der Kosteneffizienz der verschiedenen Technologiepfade. **I**: kristallines Silizium / **II:** Dünnschichttechnologie ohne Stapelzellen / **III**: Neuer Konzepte inklusive Stapelzellen. Abbildung nach [Ginley *et al.* 2008].

In toto soll ausgehend vom Marktanteil der kristallinen Siliziumtechnologie im Jahre 2013 für die Berechnung zukünftiger technologiespezifischer Installationsmengen sonach folgende Staffelung zugrunde gelegt werden:

- bis 2015: 87 %
- bis 2020: 80 %

Die vorsichtige Schätzung der Marktanteile für den Zeitraum von 2015 bis 2020 resultiert aus einer Absicherung gegen etwaige Spitzen und soll darüber hinaus eine untere Betrachtungsschranke bilden. Für Marktanteile nach 2020 fluktuiert der Markt zu stark, sodass sich eminente Unsicherheiten ergeben würden. Gleichwohl sind mögliche technologieunabhängige Installationsmengen ab 2020, wie bereits im Kapitel 4.2.3: „Besonderheiten des deutschen Marktes“ beschrieben, imponderabel. Weiter soll durch die Staffelung und Senkung der Marktanteile der kristallinen Siliziumtechnologie ab 2015 auf 80 % im Jahr 2020 der zu erwartenden Marktdurchdringung der CIGS-Technologie sowie der Stapelzellentechnologie ob ihres erheblich höheren Wirkungsgrades (vgl.: Anhang 4-3) Rechnung getragen werden.

4.4 Abgrenzung des weiteren Untersuchungsrahmens

Der Fokus der weiteren Betrachtungen zur Produktion und darauf aufbauend zum Recycling wird aus folgenden Gründen nur auf die kristalline Siliziumtechnologie, beginnend mit den Neuinstallationen des Jahres 2002, gelegt:

1. Die kumulierte Kapazität der jährlich installierten Leistung auf nationaler Ebene von 2001 bis 2013 beträgt rund 99,4 % der seit der ersten Anlageninstallation bis 2013 kumulierten Kapazitäten. Somit sind die Kapazitäten aller vor 2002 installierten Photovoltaikanlagen vernachlässigbar klein.
2. Der Anteil der kristallinen Siliziumtechnologie an den national kumulierten Kapazitäten von 2001 bis 2013 beträgt 87,6 %. In absoluten Werten ausgedrückt entspricht das rund 31.260 MW_p. Zum Vergleich: Die Summe der im selben Zeitraum national installierten Kapazitäten aller anderen Technologiepfade beträgt 4.420 MW_p, was einen relativen Anteil von 12,4 % darstellt. Dieser Gesamtanteil gilt in Summe für alle Technologien der Pfade Dünnschichtzellen und sonstige Konzepte nach der Abbildung 3-3 (Kapitel 3.2: Überblick der verschiedenen Technologien, Seite 85). Bei einer gesamttechnologischen Untersuchung müssten diese Technologiepfade ob ihrer stark unterschiedlichen Zusammensetzungen und Wirkungsweisen separaten Betrachtungen unterliegen. Durch diese notwendige Differenzierung würden sich die schon bei der obersten Klassifizierungsebene geringen absoluten Installationsmengen nochmals aufteilen und zu vernachlässigbar kleinen Beiträgen führen.
3. Wie bereits dargestellt, ist davon auszugehen, dass die Marktdominanz der kristallinen Siliziumtechnologie bis mindestens über das Jahr 2020 hinweg bestehen bleibt. Weiter ist, bei einer vorsichtigen und sänftiglichen Einschätzung, ein Marktanteil bis 2030 von mindestens 50 % anzunehmen.
4. Die Installationshistorie, die gegenwärtige Marktsituation und die mögliche zukünftige Entwicklung der Technologiemarktanteile korrelieren direkt mit der Quantität aller für ein Recycling zur Verfügung stehenden Abfallströme, welche sich in Altmodule am Lebenszyklusende, Produktionsabfälle, Abfälle aus Transport- und Installationsschäden sowie Garantiefälle unterteilen lassen. Dies führt zu einer mengenmäßigen Überlegenheit der Abfallströme der kristallinen Siliziumtechnologie für den Betrachtungsgegenstand des Photovoltaikmodulrecyclings.

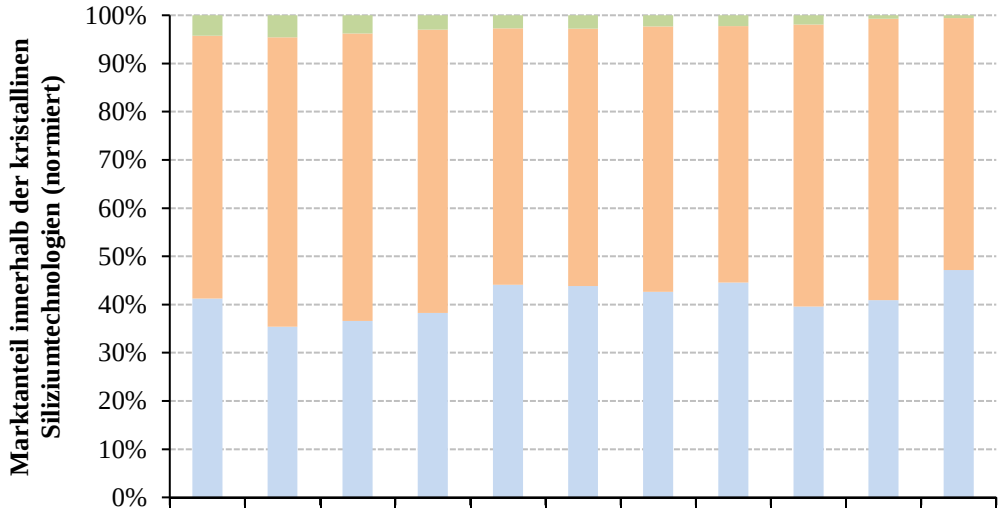
5. Wenngleich andere Technologiepfade derweilen noch höhere Potenziale zur Steigerung ihres Wirkungsgrades und zur Senkung der jeweiligen Produktionskosten als die kristalline Siliziumtechnologie besitzen, sind noch, wie bereits angedeutet, mindestens 20 Jahre Entwicklungsarbeit für eine kompetitive Massenfertigung erforderlich. Darin begründet sich auch die angenommene Marktdominanz der kristallinen Siliziumtechnologie bis zum Jahr 2030. Hinzu kommt, dass sowohl die Kostenreduktion in der Massenproduktion kommerzieller Siliziumsolarmodule als auch die Steigerung deren Wirkungsgrade noch Potenziale besitzen. Derzeit liegt der Fokus in der Wirtschaft auf der Reduktion der Produktionskosten durch Senkung der benötigten Materialmenge je Modul / Zelle. Dies betrifft insbesondere die Verdünnung der photoaktiven Schichten sowie die Verwendung neuerer Produktionstechniken zur Senkung des Materialverbrauchs für die Prozessierung der Kontaktfinger. Weitere Ausführungen und eine differenziertere Betrachtung der anstehenden technologiespezifischen Modifikationen sind insbesondere dem Kapitel 5.5 zu entnehmen.

Eine weitere Einschränkung der Differenzierung des Betrachtungsrahmens liegt in der Installationsart der kristallinen Siliziumsolarmodule. In der vorliegenden Arbeit wird nicht zwischen Dachmontagen, gebäudeintegrierten Lösungen, freistehenden Anlagen et cetera unterscheiden, da neben den Modulen alle weiteren Anlagenkomponenten (Wechselrichter, Ständerung et cetera) auf herkömmlichen Wege recycelbar sind und geltenden Gesetzestexten unterliegen. Es stehen nur die Art der Modulverarbeitung sowie die verwendete Technologie innerhalb der Klasse der kristallinen Siliziumzellen im Fokus.

Dieser Ansatz wird auch durch andere Autoren bestätigt, wie beispielsweise in [Goetzberger und Hoffmann 2010, Seite 140f]: „The electronic and electric components of a PV system such as the inverter, batteries, charge controller, and cable can be recycled by existing and proven technologies without any problems. Installation materials (for example, mounting supports or frames for facade integration of the solar modules) usually consist of metal (high-grade steel or aluminium), which can be recycled like normal scrap metal. Special technologies are needed for the recycling of solar modules regardless of whether the solar modules are made from crystalline silicon, amorphous silicon, or other thin-film material. […]”

Gleiches trifft auf die Unterteilung in netzgekoppelte und Inselsysteme zu. Hier sind ebenfalls nur die Module für die nachstehenden Betrachtungen relevant, weshalb keine Differenzierung notwendig ist. Einzig Solarzellen für sogenannte „Consumer Applications“ wie Taschenrechnern, Parkuhren, et cetera werden und wurden für die Betrachtungen ausgeschlossen.

Wie in Abbildung 3-3 (Kapitel 3.2: „Überblick der verschiedenen Technologien“, Seite 85) dargestellt, findet innerhalb der Klasse der kristallinen Siliziumtechnologie ebenfalls eine technologische Differenzierung statt. Dabei wird zwischen Zellentechnologien aus mono-, multi- und Ribbonsilizium (bandgezogenes Silizium) sowie der HIT-Zellentechnologie als Sonderfall unterschieden. Für bandgezogenes Silizium und die HIT-Zellentechnologie gilt ähnliches wie für die Dünnschichttechnologie; beide Technologien haben einen zu vernachlässigenden kleinen Marktanteil. Die Marktanteile für monokristallines, multikristallines und bandgezogenes Silizium sind normiert in der folgenden Abbildung 4-17 dargestellt. Die Absenz der HIT-Zellentechnologie begründet sich auf der einen Seite in deren Sonderform (Mischtechnologie) und andererseits in deren verschwindend geringem und nicht darstellbarem Marktanteil (< 0,5 %).

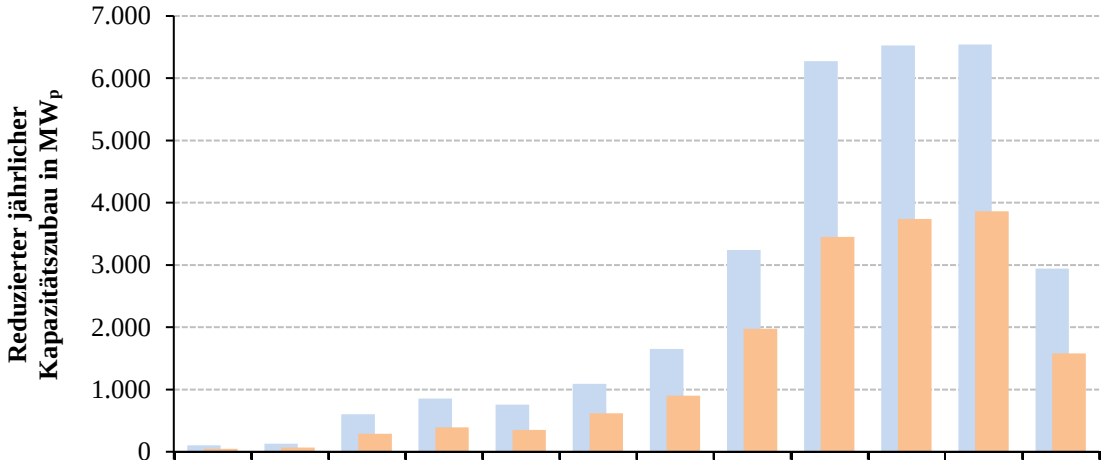


	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Monokristallines Silizium	41,3	35,4	36,6	38,3	44,1	43,8	42,6	44,6	39,6	40,9	47,2
Multikristallines Silizium	54,5	60,0	59,6	58,8	53,2	53,4	55,0	53,2	58,5	58,3	52,2
Bandgezogenes Silizium	4,2	4,6	3,8	2,9	2,7	2,8	2,4	2,2	1,9	0,8	0,6

Abbildung 4-17: Marktanteile innerhalb der Klasse der kristallinen Siliziumtechnologie exklusive HIT-Zellentechnologie. Daten nach [Neuhaus 2014], [Weber 2014] und [Hering 2011].

Die Abbildung macht deutlich, dass die gesamttechnologische Marktdominanz der kristallinen Siliziumtechnologie aus den großen Marktanteilen der monokristallinen und multikristallinen Siliziumtechnologie stammt. Eine Unterteilung in die monokristalline und multikristalline Siliziumtechnologie innerhalb der Mengenstatistiken muss indes nicht erfolgen, da sich deren Verwendung, wie bereits im Kapitel 3.3: „Evolution der kristallinen Siliziumsolarzelle“ erläutert, nicht auf den grundlegenden Aufbau und auf weitere zur Produktion eines Moduls[43] benötigte Materialien auswirkt. Der Unterschied liegt einzig im erzielbaren Wirkungsgrad (bedingt durch die Kristallqualität) und in den Kosten zur Waferproduktion.

Die betrachtungsrelevanten nationalen jährlichen Neuinstallationen reduzieren sich sonach auf die Menge der installierten Module auf Basis der mono- und multikristallinen Siliziumtechnologie. Für die regionale Installationshistorie analog den Ausführungen im Kapitel 4.2.4: „Regionale Entwicklungen“ – sprich für Sachsen samt deutschseitiger Anrainer und Berlin – sind die getroffenen Einschränkungen gleichfalls anzuwenden. Abbildung 4-18 zeigt die durch die Eingrenzung des Betrachtungsrahmens reduzierten jährlichen Neuinstallationen sowohl für Deutschland als auch für den definierten regionalen Raum.



	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013[a]
National	102	129	602	853	759	1.091	1.653	3.242	6.274	6.527	6.542	2.945
Regional	45,0	69,7	287	394	348	618	901	1.977	3.452	3.741	3.863	1.581

Abbildung 4-18: Jährlich neuinstallierte Kapazitäten reduziert auf die mono- und multikristalline Siliziumtechnologie für Deutschland und Sachsen samt deutschseitiger Anrainer (inklusive Berlin). / **a:** Schätzung des Marktanteils von bandgezogenem Silizium auf Basis der vorangegangenen Jahre zu 0,5 %.

[43] Betrifft die Produktionsschritte nach der Waferfertigung.

Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit innerhalb der mono- und multikristallinen Siliziumtechnologie liegt im verwendeten Zellenkonzept. Wie bereits im Kapitel 3.3: „Evolution der kristallinen Siliziumsolarzelle“ dargestellt, weichen kommerzielle Standardsiliziumzellen, hergestellt mittels Siebdruckverfahren, von Hocheffizienz-zellen wie der Buried-Contact-Zelle oder der PERL-Zelle (vgl.: Kapitel 3.3.4: „Hocheffizienzzellen“) durch die unterschiedliche Verarbeitung der Zellenkomponenten ab. Jene Differenzierung soll an dieser Stelle ebenfalls nicht erfolgen, da das Konzept der Standardsiliziumzelle einen vom verwendeten kristallinen Siliziumwafer unabhängigen hohen Marktanteil besitzt. 2013 lag dieser noch bei rund 92 % [Neuhaus 2014], in den vorangegangenen Jahren zwischen 95 und 99 %. Die Unterscheidung der Zellen-konzepte erfolgt deshalb nur an ausgewiesenen Stellen. Prognosen gehen jedoch davon aus, dass Hocheffizienzzellen wie das PERL-Zellendesign oder die Rückkontaktzellen allgemach Marktanteile hinzugewinnen und gegen 2020 zusammen rund 50 % Marktanteil besitzen.

Sonach soll der Fokus der nachfolgenden Betrachtungen zur Zellen- und Modulproduktion sowie zum Recycling auf der Standardsiliziumzelle mit mono- oder multikristalliner photoaktiver Schicht liegen. Weiter werden alle folgenden Statistiken auf die bereits definierte Betrachtungsebene bezogen.

4.5 Vom Siliziumdioxid zum kristallinen Standardsiliziumsolarmodul

4.5.1 Vorbetrachtungen

Bevor nun gezielt auf Material- und Energiebedarf während der Neuproduktion von Wafern, Zellen und Modulen eingegangen werden kann, wird zum besseren Verständnis an dieser Stelle die generelle Konzeption eines Standardmoduls für die auf Silizium basierende Solarzellentechnologie dargelegt. Anschließend erfolgt die Angabe der jeweils enthaltenen Materialkomponenten des definierten Standardmoduls und einer entsprechenden Standardsiliziumzelle. Dies ist zur weiteren Berechnung gesamt benötigter Stoff- und Energieströme der einzelnen Produktionstechnologien und deren kumulierten Betrachtung notwendig.

4.5.1.1 Modulbestandteile und Konzeption

Eine typische Siliziumsolarzelle erzeugt eine Kleinspannung von rund 0,5 bis 0,6 V mit einem Gleichstrom von circa 30 mA/cm² unter voller Beleuchtung [Rubin 2010]. Um sinnvoll nutzbare Spannungen zu erhalten und Solarzellen zur Stromversorgung effektiv einzusetzen, werden mehrere Solarzellen zu einem Solarmodul zusammengefasst. Dabei wird die maximale Leistung eines Moduls durch die Gesamtzahl integrierter Solarzellen und deren Verschaltung bestimmt. Charakteristisch für die heutige Fertigung von Modulen für normale Anwendungen ist eine Einbettung von 60, in Reihe geschalteten, Einzelzellen[44]. Dafür wird mittels Punktlöten eine elektrische Verbindung aus verzinnten Kupferstreifen zwischen der Sammelschiene (Minuspol) auf der Vorderseite der ersten Zelle und dem Rückkontakt (Pluspol) der sequenziell nachfolgenden Zelle hergestellt et cetera pp. Eine bestimmte Anzahl so elektrisch in Reihe geschalteter Einzelzellen wird als Strang (engl.: String) bezeichnet. Gleichwohl werden wiederum die einzelnen Stränge über verzinnte Kupferverbindungen in Reihe geschalten und ergeben so das typische Modullayout. In Folge der gesamten Reihenschaltung aller Stränge eines Moduls (und damit auch aller Einzelzellen) ergibt sich die Gesamtspannung aus der Summe der Einzelspannungen [Becker *et al.* 2000, S. 83]. Module dieser Konfiguration erreichen ihre

[44] Aber auch Zellenzahlen von 36, 48 oder 72 sind je nach Anwendungsfall üblich. [Mertens 2011, S.150]

jeweils spezifische optimale Leistung, wenn alle Einzelzellen mit der gleichen Strahlungsintensität beleuchtet werden. Die folgende Abbildung zeigt eine schematische Draufsicht eines Moduls mit beispielshalber 36 in Reihe geschalteten Einzelzellen.

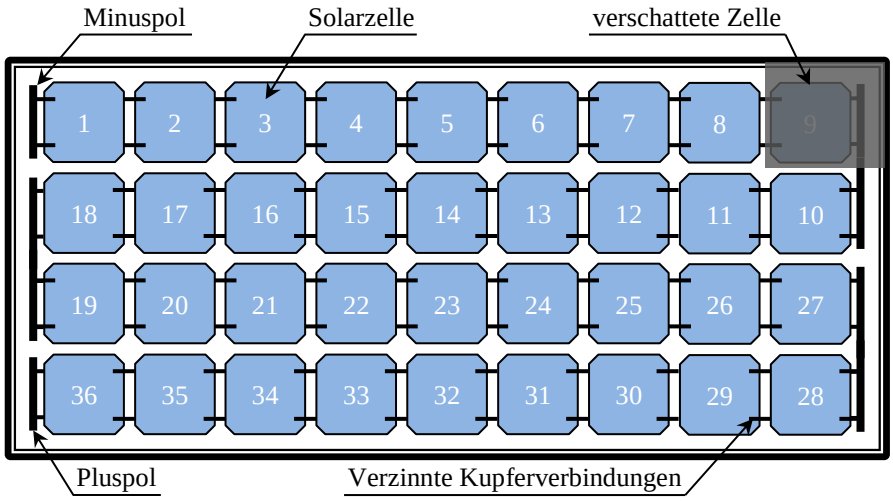


Abbildung 4-19: Schematische Darstellung eines Solarmoduls mit 36 kristallinen Siliziumsolarzellen und einer partiellen Verschattung.

Wird, wie in der Abbildung 4-19 dargestellt, nur eine Zelle verschattet oder erfährt eine Leistungseinbuße aus sonst einem Grund (Degradation, Verschmutzung, Schäden infolge mechanischer Beanspruchung, et cetera), hat das einen Leistungseinbruch des gesamten Moduls zur Folge. Neben der temporären Leistungseinbuße kann eine Teilverschattung auch zu einem Permanentschaden des Moduls führen, da verschattete Zellen im Modulverbund als Widerstand fungieren. Die verschattete Zelle wird so einer umgekehrten Spannung, erzeugt durch alle anderen beleuchteten Zellen des Verbundes, ausgesetzt, was einen elektrischen Strom durch den entstandenen Widerstand treibt. Dies führt zur Erwärmung der verschatteten Zelle (Hotspots) und kann bei langer Dauer in entsprechend hohen Temperaturen resultieren, die zum Ausfall der Zelle oder zur Zerstörung des gesamten Moduls führen können. [Rubin 2010, S. 129]

Aus diesen Gründen wird in Abhängigkeit des Modulaufbaus je Modul oder je Strang eines Modules eine Bypassdioden (BPD) eingebaut. Die Anzahl der Einzelzellen je Strang und die Anzahl der in ein Modul eingebauten Bypassdioden stellt dabei eine Funktion der Zellenqualität dar. Diese beeinflusst direkt die Widerstandsfähigkeit der einzelnen Zellen gegenüber der durch Verschattung erzeugten umgekehrten Spannung.

Somit kann keine generelle Grenzumkehrspannung definiert, restriktive eine gemein gültige maximale Anzahl von Einzelzellen je Strang angegeben werden. [Hermann *et al.* 1998] führt Grenzumkehrspannungen für verschiedene kristalline Solarzellen auf, welche in einer Bandbreite von 7,2 bis 25,2 V gestreut liegen. Dementsprechend muss für jedes Modul in Abhängigkeit der verbauten Zellen die maximale Zellenanzahl je Strang (dementsprechend auch je Bypassdiode) und die Gesamtanzahl der Stränge individuell angepasst werden. Die Höchstzahl an Einzelzellen je Strang (oder BPD) berechnet sich aus dem Quotienten von Grenzumkehrspannung und lichtinduzierter Maximalspannung. So sollten beispielsweise Zellen mit einer Grenzumkehrspannung von 7,2 V und einer lichtinduzierten Maximalspannung von 0,55 V höchstens zu 13 Stück je Strang verbaut werden. Im entsprechend gegengesetzt gelagerten Extremfall (25,2 V Grenzumkehrspannungen) sollte jeder Strang höchsten 45 Zellen beinhalten. Dies zeigt schon die zweite Variable beim Moduldesign auf – neben der Gesamtanzahl der Zellen je Modul, eben die Anzahl der Bypassdioden und entsprechend die Anzahl an Einzelzellen je Strang.

Laut [Kaltschmitt *et al.* 2005b, S. 229] wird jedoch zum Teil auf Bypassdioden je modulinternen Strang verzichtet. Grund sind erhöhte Kosten und Energieverluste. Durch die Reihenschaltung der einzelnen Zellen in einem Modul kann der Serienwiderstand des Moduls die Summe aller Einzelwiderstände der Zellen auf Grund des zusätzlichen Einflusses der Zellenverbindungen und Lötstellen übersteigen. Die dabei zustande kommenden Verluste können bis zu 3 % des energetischen Outputs eines Moduls betragen. Infolge der Verschaltung mehrerer Module zu Arrays steigt die Wahrscheinlichkeit einer partiellen Verschattung mit steigender Anlagenfläche durch beispielsweise Wolkenzug, Schattenwürfe, et cetera. Die Auswirkungen sind die Gleichen wie auf Einzelzellenbasis. Deshalb ist je Modul mindestens eine Bypassdiode integriert.

Ein Solarmodul besteht aber nicht nur aus Zellen, beziehungsweise Strängen und Bypassdioden, sondern muss die Zellen gegen Umwelteinflüsse schützen, eine gewisse mechanische Stabilität aufweisen und weiteren sicherheitstechnischen Aspekten genügen.

Abbildung 4-20 zeigt den Querschnitt eines Standardmoduls. Die Frontseite besteht typischerweise aus einem 3 bis 4 mm dicken, chemisch oder thermisch gehärtetem Glas mit geringem Eisengehalt, um mechanische Stabilität, vor allem gegen Hagel, bei minimaler Lichtabsorption zu bieten [Jungbluth *et al.* 2009, S. 65]. Die Zellenstränge sind

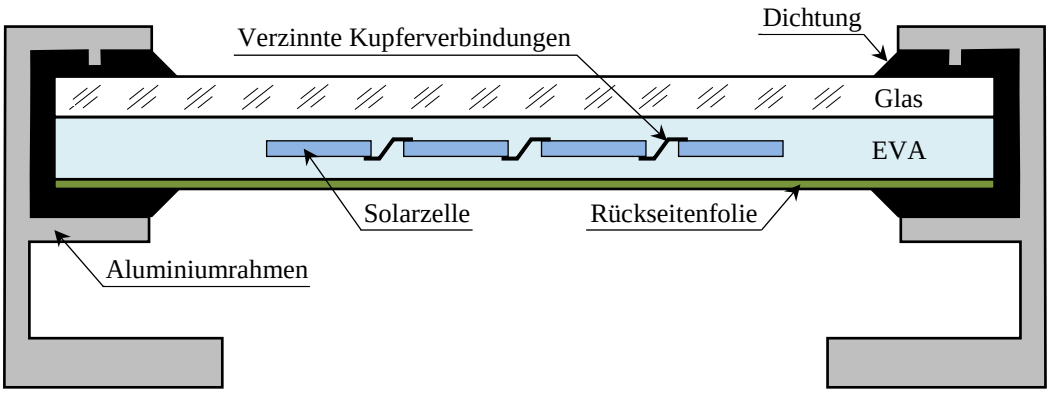


Abbildung 4-20: Querschnitt eines Glas-Folien-Moduls auf Basis kristalliner Siliziumsolarzellen. Abbildung nicht Maßstabsgetreu.

in zwei Folien aus einem transparenten Polymer eingebettet, welches auf Glas laminiert werden kann. Die am häufigsten verwendeten Materialien sind Ethylenvinylacetat (EVA) und Polyvinylbutyral (PVB). Die Zellenstränge sind dabei mit ihrer konzeptionellen Vorderseite der Modulfrontseite (Glas) zugewandt. Das transparente Polymer verändert während des Laminierungsprozesses seine strukturellen Eigenschaften und vernetzt sich. Neben der Abschottung der Solarzellen vor Umwelteinflüssen (wie beispielsweise einem Feuchteintrag über die Ränder, die Front- und die Rückseite) soll die Vernetzung ein Wandern der Zellen über die gesamte Modullebensdauer verhindern. [Ritter 2014] Auf der Modulrückseite schließt sich an das transparente Polymer ein wetterfestes Material wie beispielsweise eloxiertes Aluminium, eine weitere Glasscheibe[45] oder Polymere wie eine biaxial orientierte Polyesterfolie, beziehungsweise in den meisten Fällen ein Folienverbund aus Polyvinylfluorid (Tedlar[46]) und Polyethylenterephthalat (PET) an. [Szlufcik *et al.* 2012, S. 153] Die elektrische Verschaltung der einzelnen Zellenstränge eines Moduls und die Parallelschaltung der zugehörigen Bypassdioden erfolgt in einer, auf der Rückseite des Moduls extern aufgebrachten, Modulanschlussdose. Dafür besitzen das transparente Rückseitenpolymer und das sich anschließende wetterfeste Material je verbauten Strang zwei Löcher, die räumlich sehr nah verortet sind. Die Lage der Löcher ist so gewählt, dass sie direkt unter der Modulanschlussdose liegen und somit von ihr verdeckt werden. Die aufgebrachte Anschlussdose ist auf der Modulrückseite mit Silikon versiegelt, um Wettereinflüsse beziehungsweise Feuchtigkeitseinträge in das Modul zu verhindern. Weiter ist die Modulanschlussdose mit Steckverbindern und Kabeln für die Verschaltung des Moduls mit benachbarten Modulen ausgestattet.

[45] Im Falle der Fassadenintegration oder bei bifacialen Modulen.

[46] Tedlar ist ein geschützter Handelsname der Firma DuPont.



Abbildung 4-21: Teilverschattung eines Solarmoduls durch falsch ausgelegten Aluminiumrahmen.

Zum Schutz vor Schäden, dem Verleihen einer mechanischen Stabilität gegen Wind(-böen) und einer erleichterten Montage wird das Modul in den meisten Fällen von einem Aluminiumrahmen (AlMg3) umgeben. Gleichwohl dient eine Dichtung zwischen Aluminiumrahmen und restlichem Modul dem Widerstand gegen Umwelteinflüsse. Wie der nebenstehenden Abbildung 4-21 zu entnehmen ist, muss die Konzeption des Aluminiumrahmens bereits auf die weitere Planung zur Befestigung des Moduls angepasst werden. So muss darauf geachtet werden, dass unter geringen Beleuchtungswinkeln keine, durch die Rahmenkonstruktion bedingten, Verschattungen auftreten, die zu Leistungseinbußen sowie möglichen irreversiblen Schäden führen können.

Wenngleich rahmenlose Module am Markt verfügbar sind, bei denen bauartbedingt keine Verschattungseffekte infolge der Rahmenkonstruktion auftreten können, müssen für diese besondere Randversiegelungsmaßnahmen zum Schutz gegen atmosphärische Einflüsse sowie für eine ausreichende mechanische Stabilität getroffen werden.

Einbettungs- und Randversiegelungsmaterialen müssen derweilen sehr hohen Ansprüchen genügen. Neben den bereits benannten Kriterien, wie:

- Schutz gegen Umwelteinflüsse wie beispielsweise Eintreten von Flüssigkeiten (durch Regen, Kondenswasser und Luftfeuchte) über die gesamte Lebensdauer von mehr als 25 Jahren mit einem Temperaturfenster auf der Zellenoberseite zwischen -40 °C und +85 °C,
- Gewährleistung einer mechanischen Stabilität gegen Beanspruchungen durch Hagelkörner bis zu einem Durchmesser von 25 mm, Windlasten bedingt durch Böen bis 50 m/s und sonstigen mechanischen Druckbelastungen (Schneelast,…) bis 2.400 Pa,

muss eine hohe elektrische Isolationsfähigkeit des Moduls gewährleistet sein. [TÜV Rheinland 2009] Weiter müssen die Materialien Schutz vor Bakterienbefall und vor Schäden durch Tiere (bspw.: Vögeln) bieten. [Kaltschmitt *et al.* 2005b, S. 227]

Eine Produktzertifizierung, die die sicherheitstechnisch wichtigsten Kriterien umfasst, erfolgt beispielsweise durch die „Bauartzertifizierung von PV-Modulen“ des TÜV Rheinlands entsprechend:

- IEC 61215:2005 für kristalline Module
- IEC 61646:2008 für Dünnschichtmodule

Alle Prüfkriterien und ein Diagramm der Testsequenzen für beide Standards sind der entsprechenden Bauartzertifizierung [TÜV Rheinland 2010] auf den Seiten 4 und 5 direkt zu entnehmen.

Trotz Schwankungen der Umgebungstemperaturen im zu erwartenden Bereich besteht ein gewisses Risiko des Brechens von Lötverbindungen zwischen den Zellen ob der unterschiedlichen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialen.

4.5.1.2 Allgemeine stoffliche Zusammensetzung Standardmodul

Module auf Basis kristalliner Siliziumzellen unterscheiden sich je nach Anwendungsfall in ihrer stofflichen Zusammensetzung. So steigt der prozentuale Glasanteil für Module mit Glas auf der Front- und Rückseite beim Einsatz von bifacialen Zellen oder der Gebäudeintegration gegenüber einseitig verglasten Modulen. Gleichwohl sinkt der Aluminiumanteil für rahmenlose Module gegen Null. Module mit beidseitiger Überglasung und / oder rahmenloser Konzeptionen stellen aber derzeit noch in ihrer Anwendung die Minderheit dar. Neben diesen grundlegend strukturellen Unterschieden gibt es aber auch herstellerspezifische Abweichungen verwendeter Materialien bei sonst gleichem Einsatzgebiet.

Folgende Tabelle fast die häufigsten verwendeten Materialien für Standardanwendung zusammen und zeigt mögliche weitere Designvariablen auf.

Tabelle 4-10: Designvariablen kristalliner Siliziumsolarmodule.

		Variable		**Kommentar**
Ebene	**Zellen**	Wafer	Monokristallin	Silizium als grundlegendes Halbleitermaterial
			Multikristallin	
			Ribbon	
		Zellentechnologie	Standardzelle	Vergleich Kapitel 3.3.3
			Buried-Contact-Zelle	Die Verwendung anderer Zellenkonzepte führt zur Anpassung des Modullayouts und der Verwendung anderer Materialien inkl. Anpassung der elektrischen Verschaltung
			Rückkontaktzelle	
			Weitere Konzepte	
		Zellen-abmessungen	Größe (Länge x Breite)	Änderung der Standardwafergrößen bewirkt eine Anpassung der Zellenabmessungen
			Dicke	Reduzierung des Halbleitermaterialanteils im Modul
	Front-abdeckung	Gehärtetes Glas	verschiedene Sorten und Stärken	Starke Änderung des Materialanteils im Modul
		Antireflexions-schicht	TiO_2	Auch Doppelantireflexionsschichten aus SiO_2 und TiO_2 möglich
			Si_3N_4	
	Laminat	Materialien	EVA	Unterschiedliche Materialien
			PVB	
	Rück-abdeckung	Materialien	eloxiertes Aluminium	Vom speziellen Anwendungsfall und der verwendeten Zellentechnologie abhängig. Polymere meist biaxial orientierte Polyesterfolie oder ein Tedlar-PET-Verbund
			weitere Glasscheibe	
			Polymere	
	Modul	Zellenanzahl	Gesamtzahl der Zellen je Modul	Abhängig vom Anwendungsfall, der Grenzumkehrspannung und damit herstellerspezifisch. Neuere Konzepte auch mit Integration der BPD in der Zelle.
		Strang	Anzahl Zellen	
			Anzahl BPD	
		Abmessungen	Länge x Breite x Höhe	Variiert nach Anwendung
		Anwendung	einseitig verglast	Anpassung des gesamten Modullayouts und Verschiebung der Massenanteile der verwendeten Materialien
			bifacial	
			Gebäudeintegriert	
		Anschlussdose	verwendete Materialien	Unterschiedlich je nach Ausführung. Silikon zur Versiegelung

Nach [Beckmann 2013, S. 3], [Wambach 2013, S. 9], [Binder 2013, S. 11], [Sander *et al.* 2007, S. 34] und [Sander *et al.* 2004, S. 22] können folgende gemittelte Werte einseitig verglaster Module für Normalanwendungen angegeben werden, welche in Tabelle 4-11 zusammengefasst wurden.

Tabelle 4-11: Gemittelte Werte einzelner Komponenten in Massen-% eines einseitig verglasten Solarmoduls auf Basis kristalliner Siliziumsolarzellen.

	Angaben in Massen-%	Beckmann 2013	Wambach 2013	Binder 2013	Sander *et al.* 2007	Sander *et al.* 2004
	Bezugsjahr	2013	2013	2010	2007	2003
Komponente	**Glas**	65-95	60-85	74	74,16	62,7
	Alurahmen	10-20	10-20, 0	10	10,30	22
	EVA	0,1-10	7-10	6,5	6,55	7,5
	Rückseitenfolie				3,6	2,5
	Anschlussdose	1	1-1,5			1,2
	Kabel (Kupfer)		verzinntes Cu ~ 1	0,6	0,57	0,37
	Halbleitermaterial (Silizium)	3-4	3-4	3	3,48	4
	Zink			0,12	0,12	0,12
	Blei			< 0,1	0,07	0,12
	Silber			< 0,006	0,004-0,006	0,14
	Kleber, Vergussmassen				1,16	
	Sonstige Stoffe (Pb, CdTe, Ag, In, Ga)	<0,01-1				
	Summe [%]			94,326[47]	100,015[48]	100,65

Für die nachfolgenden Betrachtungen bilden die Massenanteile nach [Sander *et al.* 2007] die Diskussionsbasis. Grund ist die sehr gute Datenlage und die direkte Vergleichbarkeit der Werte mit [Binder 2013] und [Sander *et al.* 2004], inklusiver der Möglichkeit Veränderungen und Tendenzen aufzeigen zu können.

Der Glasanteil bezieht sich komplett auf das Frontglas. Zur Verglasung wird bis auf wenige Ausnahmen[49] ein 3 bis 4 mm dickes Flachglas – im Speziellen ein thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas nach EN 12150-1:2000 – verwendet.

Lediglich für Spezialanwendungen oder Labormodule kommt teureres Borosilikatglas zum Einsatz. Neben der bei kristallinen Siliziumzellen bereits auf den Zellen vorhandenen Antireflexionsschicht kann zusätzlich eine herstellerspezifische Beschichtung des Glases existieren (meist ebenfalls eine Antireflexionsschicht). Für den Modulrahmen

[47] Silber- und Bleigehalte gehen mit ihrem Maximalwert ein, da die Differenz zu 100 % sonst entsprechend höher ausfallen würde.

[48] Silbergehalt geht in die Summenbildung mit seinem durchschnittlichen Wert (0,005) ein.

[49] Quelle: Moduldatenblätter verschiedener Hersteller

wird eloxiertes Aluminium verwendet, was aus ästhetischen Gründen farblich an die verbauten Zellen im Modul angepasst wird. Als Einbettungsmaterial der Zellen in das Modul dient derzeit noch hauptsächlich Ethylenvinylacetat (EVA). Die Rückseite eines einseitig verglasten Moduls bildet typischerweise ein in Polyvinylfluorid (Tedlar) eingeschlossenes Polyethylenterephthalat. Neben UV-Beständigkeit, Schutz vor Umwelteinflüssen und mechanischer Stabilität dient der Rückseitenverbund aus EVA und Tedlar ebenfalls der elektrischen Isolation. Bei den in der Tabelle 4-11 ausgewiesenen Massenanteilen an Kleber und Vergussmassen handelt es sich um Epoxidharz und Silikon. Das Epoxidharz fungiert dabei als Primer zwischen EVA und Tedlar auf der Modulrückseite. Silikon wird zur Versiegelung der Anschlussdose auf der Modulrückseite verwendet. Die Silbergehalte sind auf die Kontaktierungen, beziehungsweise Kontaktfinger und Stromsammelschienen der kristallinen Siliziumzellen zurückzuführen. Die Massenanteilsangaben der Komponente Kabel (Kupfer) beziehen sich auf die Verschaltung der Zellen, Stränge und deren Verkabelung. Neben Kupferkabeln tragen die Lötbändchen zum Kupfergehalt der Module bei. Blei- und Zinkgehalte resultieren größtenteils aus den Lötlegierungen.

Anstehende Trends zur Materialsubstitution wie beispielsweise der Verwendung alternativer Laminierungsfolien werden an dieser Stelle nicht beachtet. Für eine ausführliche Diskussion wird auf Kapitel 5.5.2 „Potenzielle Materialsubstitutionen und Reduktion spezifischer Ingredienzien“ verwiesen.

Ein Vergleich der Modulzusammensetzung nach [Sander *et al.* 2007] und [Sander *et al.* 2004] zeigt eine Tendenz zu steigenden relativen Glasanteilen (durchschnittlich von 62,7 % auf 74,16 %) ob reduziertem Rahmenprofil (22 % auf 10,3 %)[50]. Gleichwohl resultiert diese Tendenz auch aus steigenden Modulgrößen. Durch Multiplikation der Differenz der Modulgrößen (Fläche) mit der Glasstärke[51] ergibt sich so ebenfalls ein erhöhter relativer Glasanteil. Ähnliche Rückschlüsse lässt auch der Vergleich mit [Binder 2013] zu.

[50] [Sander *et al.* 2007] spricht von reduzierten Metergewichten.

[51] Durch verschiedene geforderte mechanische Stabilitäten in Abhängigkeit des Anwendungsfalls werden mannigfaltige Glasstärken genutzt und können so zu stark schwankenden relativen Glasanteilen führen. Für die vorliegende Betrachtung wird von homogenen Glasstärken, bedingt durch homogene Einsatzfelder der Module, ausgegangen.

Weiter fällt ein kontinuierlich sinkender Anteil der verwendeten photoaktiven Substanzen (Halbleitermaterial Silizium) auf. Dies begründet sich in der Verwendung dünnerer Zellen durch fortschreitende Zellentechnologien. Dementgegen stieg der Kupferanteil durch eine Verbreitung der Lötbändchen ob höherer Ströme, die aus der Effizienzsteigerung der Zellen hervorgehen. Durch neue Produktionstechnologien und Fortschritte in der Siebdrucktechnik konnte der Silbergehalt durch wesentlich dünnere Metallfinger und Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Silberpasten enorm gesenkt werden. Bei der Verwendung bleifreier Lötlegierungen kann sich der Silbergehalt wiederum erhöhen. Dagegen würde dann der Bleigehalt gegen Null sinken.

Neben der Heterogenität des Aufbaus der Module stellen die verwendeten Zellen einen weiteren materialrelevanten Punkt dar. Wenngleich auf Grund der geringen Zellendicken die Zellen nur rund 3 Ma-% ausmachen, enthalten sie viele wertvolle Materialien. Diese sind im Einzelnen in vorheriger Tabelle 4-11 nicht mit aufgeführt, da in kristallinen Siliziumsolarzellen das Halbleitermaterial Silizium den mit Abstand prozentual größten Anteil stellt. Kristalline Hocheffizienzzellen (wie die Buried-Contact-Zelle, die Rückkontaktzelle und die PERL-Zelle) bleiben für die weitere Betrachtung forthin ausgeschlossen. Grundlage bildet die mittels Siebdrucktechnik hergestellte kristalline Siliziumstandardzelle. Diese vereint alle technologischen Neuerungen, die mit den Zellenkonzepten der textured non-reflecting „black cell“ und der „violet cell“ eingeführt wurden. Nach Kapitel 3.3.3 sind dies im Wesentlichen:

- eine Antireflexionsbeschichtung
- das BSF,
- das FSF[52],
- ein dünner n^+-Emitter,
- schmale Frontkontakte,
- die Passivierung der Zellenoberfläche und
- die Texturierung der Zellenoberseite

Die während der gesamten Produktionssequenz eines kristallinen Standardsiliziumsolarmoduls auf Basis dieser definierten Standardzelle (Grundlage bildet Aufbau der textured non-reflecting „black cell“) verwendeten Materialien sowie desideraten Stoff- und Energieströme werden nun in den folgenden Kapiteln gezielt untersucht.

[52] Findet bisher nur partiell Anwendung in der kommerziellen Produktion einer kristallinen Standardsiliziumzelle.

4.5.2 Siliziumaufreinigung und Ingotherstellung

4.5.2.1 Theoretische Grundlagen der Siliziumraffiniation

Grundlage der Produktion kristalliner Siliziumzellen ist die Herstellung von hochreinem Halbleitermaterial. Dafür ist es notwendig, die natürlich vorkommenden Siliziumverbindungen in mehreren Schritten gezielt aufzureinigen. Silizium liegt mit 25,8 Ma.-% als zweithäufigstes chemisches Element nach Sauerstoff in der Erdkruste als silikatisches Mineral oder Siliziumdioxid vor. Natürliches Siliziumdioxid wird als Quarz bezeichnet, der wiederum Hauptbestandteil von Sand ist. Quarz besitzt rund 46,74 Ma.-%[53] reines Silizium [Barthelmy o.J.].

4.5.2.1.1 Carbothermische Reduktion – MGS-Qualität

In einem ersten Reinigungsschritt wird Siliziumdioxid zu elementarem Silizium carbothermisch reduziert[54]. Dazu wird Quarz mit einem Zuschlag von Koks, Kohle und Holz einem elektrischen Lichtbogenofen aus Grafitelektroden zugeführt. Die folgende Abbildung 4-22 zeigt eine Prinzipskizze des Verfahrens.

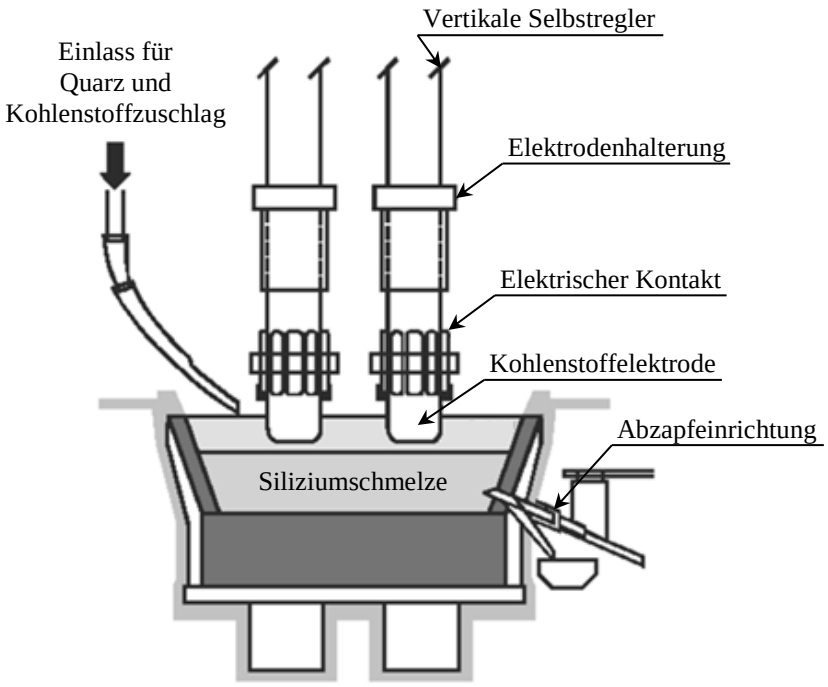


Abbildung 4-22: Lichtbogenofen zur carbothermischen Reduktion von Siliziumdioxid zu elementarem Silizium.

[53] Ergibt sich aus dem Verhältnis der relativen Atommassen von Silizium, Sauerstoff und Siliziumdioxid.

[54] Der Verbrennungssauerstoff stammt sowohl aus der Verbrennungsluft als auch vom Siliziumdioxid.

Die im Ofen stattfindende Elementarreaktion:

$$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO \qquad \textbf{Formel 4-1}$$

läuft bei Temperaturen zwischen 1.800 °C und 2.000 °C ab. Das am Ofenboden abgezapfte flüssige Silizium kühlt anschließend aus und erstarrt. Nach dieser ersten Aufbereitung liegt es mit einer Reinheit von > 98 %, als sogenanntes metallurgisches Silizium (MGS[55]), vor. Die Reinheit des MGS ist von der Verunreinigung und der Herkunft des Quarzes sowie der Kohlenstoffquellen abhängig. Typische Verunreinigungen des MGS und deren Gehalte sind in der nachstehenden Tabelle 4-12 aufgeführt.

Tabelle 4-12: Typische Verunreinigungen von MGS nach der carbothermischen Reduktion im Lichtbogenofen.

		Element								
Gehalt in ppm		**Fe**	**Al**	**C**	**Ca**	**Ti**	**V**	**Ni**	**B**	**P**
Quelle	**Demin 2012, S. 25**	1.600-3.000	1.200-1.400	700	590	150-200	100-200	40-80	37-45	27-30
	Jungbluth *et al.* 2009, S. 17	3.000	1.500	21 als CO	200		230	130	22	25
	Bathey und Cretella 1982, S. 3079	1.500-6.000	1.000-4.000	1.000-3.000	250-620	120-275	50-250	10-95	40-60	20-45

Im Jahr 2005 wurden weltweit rund 900.000 t MGS produziert, wobei rund 50 % als Legierungselement bei der Stahlherstellung Verwendung fanden. Weitere 45 % entfielen auf die Silikonherstellung. Nur rund 5 % wurden für die Produktion von Halbleiterelementen eingesetzt. [Fishman 2008, S. 39]

Für den Einsatz in der Solarzellenproduktion muss MGS weiter gereinigt werden, da sich jegliche Verunreinigungen des Siliziums negativ auf den Wirkungsgrad der Solarzellen auswirken. Dies soll auch die nachstehende Abbildung 4-23 nochmals verdeutlichen. Vertiefende Informationen über Verunreinigungen in MGS und in anderen Reinheitsstufen des Siliziums, sowie deren Auswirkungen auf den Zellenwirkungsgrad bietet [Coletti 2011].

[55] MGS leitet sich aus der englischen Bezeichnung „metal grade silicon“ ab.

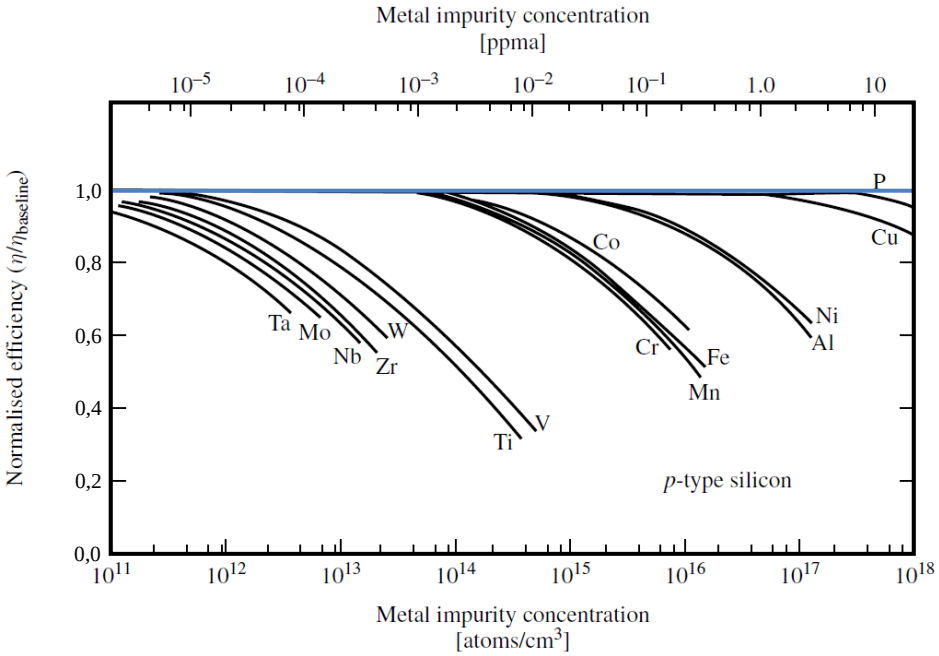


Abbildung 4-23: Effizienz von Solarzellen in Abhängigkeit der Konzentration spezifischer Verunreinigungen. Originalabbildung in [Ceccaroli und Lohne 2003, S. 192].

Für die weitere Aufreinigung von MGS, auf in der Photovoltaik nutzbare Reinheiten, stehen wenige (ausgereifte) Verfahren zur Verfügung. Dabei stellt das Siemensverfahren mit einem Anteil von circa 74 % an der weltweiten MGS-Raffination den Stand der Technik dar. [Odden *et al.* 2008, S. 2] Weitere Verfahren drängen auf den Markt, besitzen aber auch andere Qualitätsmerkmale des Outputs. Für Standardsiliziumzellen ist eine Reinheit des Halbleitermaterials von mindestens 6N[56] erforderlich. [Safarin *et al.* 2012, S. 89]

4.5.2.1.2 Trichlorsilan und Siemensverfahren – EGS-Qualität

Im nächsten Schritt der Siliziumraffination wird MGS in gasförmige Chlorsilane umgewandelt, um anschließend mittels fraktionierter Destillation hochrein abgeschieden werden zu können. Darauf folgt die Rekristallisation im sogenannten Siemensprozess zur Herstellung von polykristallinem Silizium mit einer 7N- bis 9N-Reinheit (in Abhängigkeit der Weiterbehandlung). Das auf diese Weise gewonnene polykristalline Silizium besitzt einen wesentlich geringeren Gesamtfremdstoffanteil, als für die Photovoltaik benötigt. Im Falle der hohen Reinheit von 9N wird es für die Halbleitertechnik zur Produktion von bspw. Computerchips verwendet; deshalb auch die Bezeichnung: EGS[57].

[56] Steht für eine „sechs neuner“ Reinheit (99,9999 %). Das entspricht einem Gesamtfremdstoffanteil von maximal 0,0001 % (1 ppm).

[57] EGS leitet sich aus der englischen Bezeichnung „electronic grade silicon“ ab.

Um aus MGS Chlorsilane zu erhalten, werden die MGS-Stücken nach der carbothermischen Reduktion im elektrischen Lichtbogenofen und deren anschließender Erstarrung auf Korngrößen < 0,5 mm zermahlen. Dieses MGS-„Puder“ wird in einem Wirbelschichtreaktor heißer Salzsäure (HCl) ausgesetzt. Im Reaktor entstehen verschiedene gasförmige Fraktionen von Chlorsilanen, genauer die Nebenprodukte Monochlorsilan (SiH_3Cl), Dichlorsilan (SiH_2Cl_2), Siliziumtetrachlorid ($SiCl_4$) und Monosilan (SiH_4), sowie hauptsächlich Trichlorsilan ($SiHCl_3$) nach der folgenden Reaktionsgleichung:

$$Si + 3HCl \rightarrow SiHCl_3 + H_2 \qquad \textbf{Formel 4-2}$$

Die Prozesstemperatur sollte zwischen 300 und 350 °C liegen, um eine Trichlorsilanausbeute von 80 – 95 % zu erreichen. Durch die exotherme Natur der Reaktion (Gleichung 4-2) sinkt die Trichlorsilanausbeute des Prozesses allerdings mit steigender Temperatur, wodurch eine Kühlung des Prozesses notwendig ist. [Odden *et al.* 2008, S. 3f]

An die Hydrochlorierung schließt sich eine Quenchkühlung an. Bei der nachfolgenden Destillation können so je nach Anlagenkonfiguration alle oder nur bestimmte Fraktionen in Reihenfolge ihrer Siedetemperaturen sortenrein abgetrennt werden.

Tabelle 4-13: Fraktionen von Chlorsilanen mit Angabe der Siedetemperatur.

		Abkürzung	**Summenformel**	**Siedetemperatur**
Fraktion	**Siliziumtetrachlorid**	STC	$SiCl_4$	57,6 °C
	Trichlorsilan	TCS	$SiHCl_3$	31,8 °C
	Dichlorsilan	DCS	SiH_2Cl_2	8,3 °C
	Monochlorsilan	MCS	SiH_3Cl	-30,4 °C
	Monosilan	MS	SiH_4	-112,3 °C

Wenngleich die meisten Anlagen lediglich die Abtrennung von TCS verfolgen, fällt STC ob seiner, im Vergleich zu den anderen Fraktionen, höchsten Siedetemperatur ohne Verunreinigung durch die anderen Chlorsilane an. Durch die Verwendung von zwei Rektifizierkolonnen kann die Destillation bei der technisch und energetisch günstigen Temperatur von 20 °C (erste Kolonne) und 40 °C (zweite Kolonne) erfolgen. Abbildung 4-24 und Abbildung 4-25 zeigen ein Verfahrensschema der beschriebenen Destillation und das zugehörige Siedediagramm.

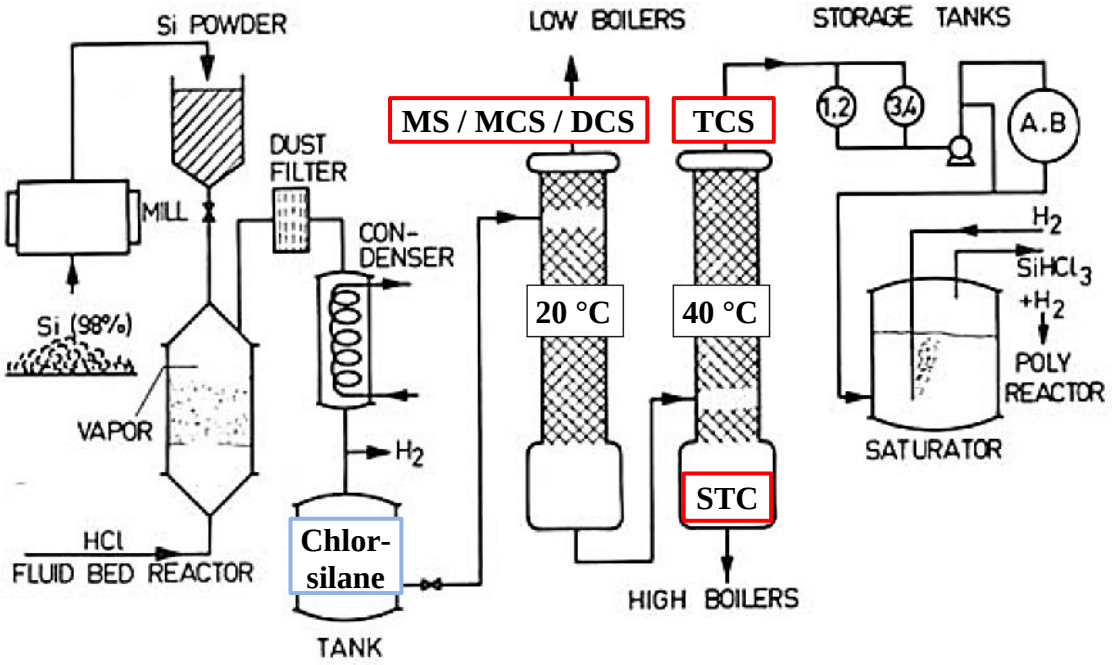


Abbildung 4-24: Schema der Gewinnung von hochreinem Trichlorsilan mit zwei Rektifizier-Kolonnen bei 20 °C und 40 °C. Abbildung nach [Wagemann und Eschrich 2010, S.93].

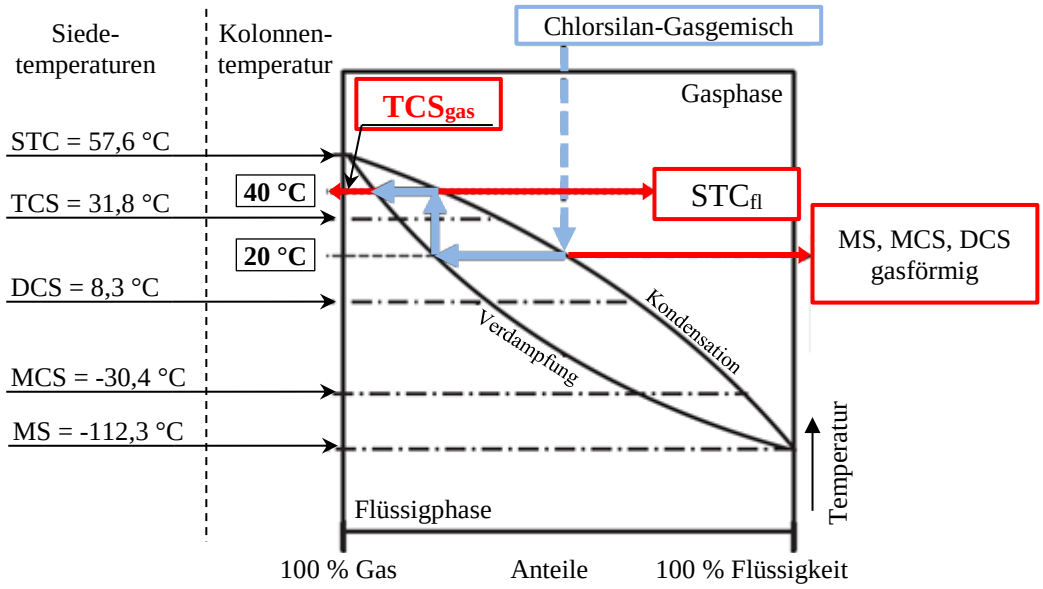


Abbildung 4-25: Siedediagramm der Chlorsilane und Erzeugung von hochreinem Trichlorsilan $SiHCl_3$ (TCS) mit zwei Rektifizier-Kolonnenbei 20 °C und 40 °C. **rot:** Output / **blau:** Input. Abbildung nach [Wagemann und Eschrich 2010, S. 93].

Während der Hydrochlorierung reagieren ebenfalls die im MGS enthaltenen Verunreinigungen zu Chloriden (wie beispielsweise zu: $FeCl_2$, BCl_3, PCl_3, $CaCl_2$, $AlCl_3$, …). Die nichtflüchtigen Metallchloride sammeln sich mit dem STC im Sumpf der zweiten Rektifizierkolonne, die flüchtigen Vertreter entweichen zusammen mit MS, DCS und MCS am Kopf der ersten Rektifizierkolonne.

Für weiterführende Informationen über die Mechanismen während der Destillation, die Auslegung der zugehörigen Destillationskolonnen, die Bestimmung der theoretischen Bodenzahl und anzuwendende Prozesstemperaturen wird der interessierte Leser an dieser Stelle auf [Weiß *et al.* 1993] verwiesen.

Im Anschluss an die Destillation erfolgt die thermische Zersetzung des reinen TCS (nachstehend als TCS_R gekennzeichnet). Der Prozess verläuft in einem sogenannte Glockenreaktor (engl.: bell-jar) bei Temperaturen zwischen 1.100 und 1.175 °C. [Jäger-Waldau 2012, S. 1167] Abbildung 4-26 zeigt den Querschnitt des typischen Reaktoraufbaus.

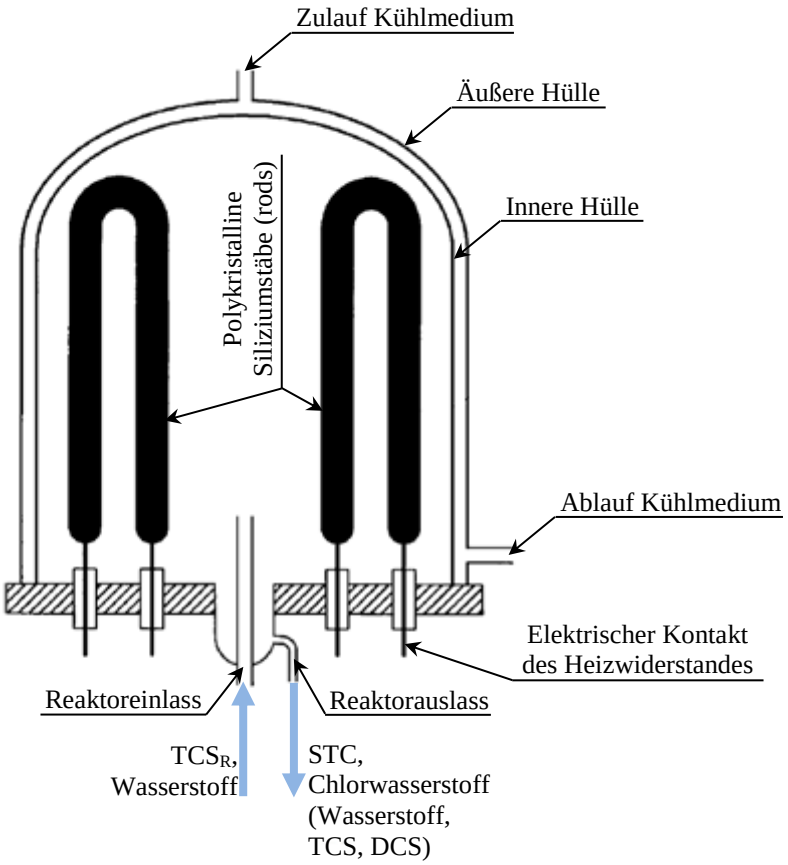


Abbildung 4-26: Schematischer Aufbau eines typischen Siemensreaktors. Abbildung nach [Ceccaroli und Lohne 2003, S. 170].

Der Reaktor besteht aus elektrisch beheizten Siliziumkeimstäben (rods), einem Ein- und Auslass sowie einer kühlbaren Außenwandung. TCS_R wird, mit reinem Wasserstoff im Verhältnis 1:9 verdünnt, dem Reaktor am Einlass zugeführt. Das Gas zersetzt sich an den heißen Siliziumstäben unter Abscheidung von hochreinem Silizium. Zu Beginn des diskontinuierlichen Prozesses besitzen die Keimstäbe einen Durchmesser von 7 bis 8 mm. Während des Prozesses wachsen diese Stäbe über ihre gesamte Länge von 2 m auf einen Durchmesser von 15 - 20 cm an. [Odden *et al.* 2008, S. 5] Gleichzeitig bilden sich aus

dem TCS_R Nebenprodukte wie HCl, TCS, DCS und vor allem STC, die über den Reaktorauslass entweichen. Das hohe Verdünnungsverhältnis mit Wasserstoff begrenzt die Entstehung dieser Nebenprodukte, ist aber auch für die Abscheidung von Silizium an den Stäben notwendig. Wenngleich die Kühlung der Außenwand für einen beheizten Prozess energetisch kontraproduktiv und deshalb mit hohem Energieaufwand und -verlust verbunden[58] ist, ist sie aus verfahrenstechnischen Gründen unabdingbar. Die gekühlten Außenwände limitieren die Zersetzung von TCS_R und damit die Ablagerung von hochreinem Silizium auf die beheizten Stäbe. Typisch dimensionierte Reaktoren besitzen rund 30 dieser „umgekehrt, U-förmigen" Stäbe[59]. Die Siliziumausbeute aus dem TCS_R während des Prozesses liegt um die 25 %. So entstehen rund 3 bis 4 mol STC je mol hochreines polykristallines Silizium. Dadurch werden große Mengen an Chlor und nicht konvertiertem Silizium durch die Nebenprodukte gebunden und mit ihnen aus dem Prozess ausgetragen. Nach [Ceccaroli und Lohne 2003, S. 171f] können zusammenfassend folgende Nachteile des Prozesses aufgeführt werden:

- Hoher Energiebedarf des Verfahrens durch hohe Energieverluste.
- Es werden zwei Energieversorgungen für den Prozess benötigt. Eine für das Vorheizen der Keimstäbe zu Beginn des Prozesses. Die andere zur Regelung der Temperatur im quasikontinuierlichen Prozessteil.
- Die elektrische Verbindung zu den Keimstäben besteht aus Graphit, was eine Verunreinigungsquelle darstellt.
- Der Prozessstart ist fehleranfällig und kann zu Abbrüchen führen.
- Mögliche Entstehung von Hot Spots.
- Ungleichmäßige Abscheidung von Silizium und Gaseinschlüsse sind möglich.
- Eine kontinuierliche Anpassung der Prozessparameter wie Gasfluss und Heizenergie ist notwendig.
- Es handelt sich um einen diskontinuierlichen Prozess.
- Es fällt eine große Menge an Nebenprodukten an.

Das hochreine Polysilizium fällt somit in Stäben mit einem Durchmesser von bis zu 20 cm und einer Länge von 1 m an. Da polykristallines Silizium sowohl für den Einsatz in der Elektronikindustrie als auch in der Solarindustrie eine nicht ausreichende Qualität der Kristallstruktur besitzt, muss es weiteren Aufbereitungsschritten unterzogen werden.

[58] Laut [Ceccaroli und Lohne 2003, S. 171] gehen über 90 % des energetischen Inputs über die gekühlten Reaktorwände verloren.

[59] Modernste Reaktoren können bis zu 50 dieser Stäbe beinhalten.

In Abhängigkeit des sich anschließenden Verfahrens können aus dem Polysilizium verschiedene Reinheiten hergestellt werden. Schließt sich ein tiegelfreier Prozess (beispielsweise Zonenreinigung) an, werden EGS-Reinheiten (9N) erreicht. Wird ein Guss- oder Zugverfahren verwendet, können sogenannte SGS-Reinheiten[60] (7N) erreicht werden. Die Bezeichnung „Solar grade Silicon“ (SGS) kann an dieser Stelle irreführend sein. EGS wird auf Grund seiner hohen Qualität für Bauelemente in der Leistungselektronik eingesetzt (beispielsweise hochbelastbare Bauelemente wie Thyristoren). SGS besitzt mit einer 7N-Reinheit immer noch eine genügend hohe Qualität für den Einsatz in der Chipindustrie für Bauelemente aller Art. Gleichwohl genügen beide Standards bei weitem dem Einsatz in der Solarindustrie. Eine Übersicht der Reinheiten und der Einsatzgebiete bietet Tabelle 4-15 auf Seite 233.

4.5.2.1.3 Weitere Verfahren – SGS- und UMG-Qualität

Neben dem Siemensverfahren gibt es mehrere Ansätze zur gezielten Herstellung von polykristallinem SGS und UMG[61] (6N). Wacker Polysilicon setzt beispielsweise einen Wirbelschichtofen für eine kontinuierliche Herstellung ein. Dabei reagiert TCS_R im Reaktor mit bereits vorhandenen kleinsten Siliziumkörnchen zu polykristallinem Siliziumgranulat mit einem Durchmesser bis zu 0,7 mm. [Wagemann und Eschrich 2010, S. 95] Das Granulat in SGS-Qualität kann kontinuierlich dem Reaktor entnommen werden. Vorteile gegenüber dem herkömmlichen Siemensverfahren sind neben der kontinuierlichen Betriebsweise eine höhere Reaktionsgeschwindigkeit, eine um rund 50 % gesenkte Heizleistung (keine Kühlung erforderlich) und eine bessere Eignung des Granulats für sich anschließende, zur Herstellung der in der Solarindustrie benötigten Kristallstruktur, Zieh- und Gussverfahren.

Weiter ist eine Substitution des TCS_R mit hochreinem MS durch einen veränderten Destillationsprozess möglich. Vorteil ist ein nahezu geschlossener Kreislauf aller Nebenprodukte während der Umwandlung von MGS in MS. Das so aufgereinigte MS kann anschließend sowohl im Siemensreaktor als auch im Wirbelschichtofen unter Abscheidung von hochreinem Silizium thermisch zersetzt werden. Weitere Informationen zu diesem, als „Union Carbide Process“ bezeichneten Verfahren, bieten [Ceccaroli und Lohne 2003] und [McKetta und Dekker 1993].

---

[60] SGS leitet sich aus der englischen Bezeichnung „solar grade silicon“ ab.

[61] UMG leitet sich aus der englischen Bezeichnung „upgraded metallurgical grade silicon“ ab.

Einen Schritt weiter geht das US-Unternehmen Ethyl Corporation, welches neben der Substitution des Siemensreaktors zugunsten eines Wirbelschichtofens ebenfalls das Ausgangsmaterial MGS ersetzt. Wenngleich dieses Verfahren dasselbe Ziel wie der „Union Carbide Process“, genauer die thermische Zersetzung von MS im Wirbelschichtofen, verfolgt, unterscheidet es sich in der Gewinnung des MS. Grundlage bildet nicht MGS, sondern Siliciumtetrafluorid (SiF_4). Siliciumtetrafluorid ist ein Abfallprodukt der Düngemittelindustrie. Mehrere zehntausend Tonnen sind davon jährlich verfügbar, womit es ein hohes Potenzial als kostengünstiges Ausgangsmaterial besitzt. [Ceccaroli und Lohne 2003, S. 174]

Abbildung 4-27 zeigt das Prinzip eines Wirbelschichtreaktors, wie er in den beschriebenen Verfahren von Wacker Polysilicon, Ethyl Corporation und dem „Union Carbide Process“ Verwendung findet.

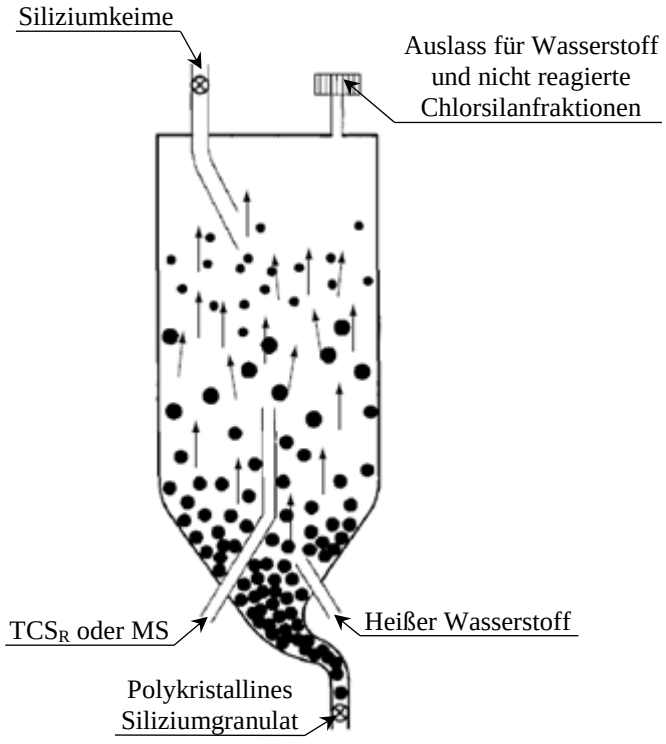


Abbildung 4-27: Schematischer Aufbau eines typischen Wirbelschichtreaktors für die Herstellung von polykristallinen Siliziumgranulat. Abbildung nach [Ceccaroli und Lohne 2003, S. 174].

Mit den eben erwähnten drei Aufreinigungsprozessen können mittels sich anschließender Zieh- und Gussverfahren Reinheiten in SGS-Qualität erreicht werden. Ein weiterer Ansatz ist die Herstellung von polykristallinem UMG. Die Firma Silicon Materials betreibt ein Verfahren zur gemeinsamen Schmelze von MGS und Aluminium und der anschließenden Abscheidung von UMG aus der Legierungsschmelze in Form einer festen

Phase. Der Unterschied zu den bereits beschriebenen Verfahren besteht darin, dass keine Verdampfung und Kondensation über Chlorsilane erfolgt. Im ersten Schritt wird MGS in einer Aluminiumschmelze bei rund 800 °C gelöst. Beim folgenden Abkühlungsprozess flockt zuerst das Silizium aus, wobei die mit dem MGS eingetragenen Verunreinigungen wie Kohlenstoff, Bor, Phosphor et cetera durch Segregation in der Schmelze gelöst bleiben. Das flüssige Aluminium wird dem Prozess entzogen. Die verbliebenen Siliziumflocken sind mit einer dünnen Aluminiumschicht bedeckt, die durch einen anschließenden Ätzprozess entfernt wird. Die Ätzlösung wird wiederum entzogen und enthält nun den restlichen Aluminiumanteil als Aluminiumhydroxychlorid, was in der Abwasserwirtschaft Verwendung findet. Die Siliziumflocken werden wieder eingeschmolzen, wodurch sich die Restgehalte verbliebener Aluminiumatome an der Oberfläche der Schmelze anreichern. Nach Erstarrung der Schmelze kann so der restliche Aluminiumanteil als dünne Oberflächenschicht entfernt werden. Mit diesem Verfahren kann bei deutlich gesenktem Energieaufwand eine 6N-Reinheit (UMG-Qualität) erreicht werden, was ausreichend für Gussblöcke zur Fertigung multikristalliner Solarzellen ist.

Für die Herstellung von polykristallinem UMG gibt es noch eine Vielzahl weiterer Verfahrensansätze. Kernprozesse sind dabei beispielsweise:

- Abdampfen,
- Auslaugen,
- mehrfaches Aufschmelzen und Rekristallieren,
- Elektronenstrahlbehandlung sowie
- Plasmaanwendungen.

Neben der geforderten Mindestreinheit (gesamt) des für die Produktion von Siliziumsolarzellen benötigten Halbleitermaterials sind in der nachstehenden Tabelle 4-14 weitere Mindestanforderungen an den Gehalt ausgewählter Elemente angegeben und mit den derzeit erreichbaren Gehalten in UMG verglichen.

Tabelle 4-14: Vergleich der Mindestanforderungen an den Gehalt ausgewählter Elemente für die Solarindustrie und UMG. Daten nach [Ceccaroli und Lohne 2003, S. 177 und S. 198].

		Element							
		C	**O**	**B**	**P**	**Fe**	**Al**	**Ca**	**Ti**
Reinheit	**Maximalgehalt für PV [Ma-ppm]**	4	5	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Erreichbar mit UMG [Ma-ppm]	< 5	< 6	0,04-0,1	0,03-0,14	< 0,05	< 0,01		< 0,01

4.5.2.2 Grundlagen der Ingotherstellung

Da der Einsatz von Silizium als Halbleitermaterial in der Photovoltaikindustrie neben dem Fremdstoffanteil auch von dessen Kristallqualität abhängig ist, werden im Folgenden die sich an die Aufreinigungsprozesse des Siliziums anschließenden Verfahren beschrieben. Diese dienen der Anpassung der Kristallqualität von polykristallinem Silizium und können abhängig von der Prozessart wiederum Verunreinigungen in das bereits gereinigte Silizium bewirken, sodass letztendlich die Reinheitsklasse des Ausgangsstoffes für die Zellenproduktion auch durch diese Prozesse beeinflusst wird. Grundlegend muss zwischen Verfahren zur Herstellung von monokristallinem und multikristallinem Silizium[62] unterschieden werden.

4.5.2.2.1 Monokristallines Silizium

Zur Herstellung von hochreinem monokristallinem Silizium sind zwei industriell genutzte Standardtechnologien verfügbar: das Zonenziehverfahren (FZ-Verfahren)[63] und das Czochralskiverfahren[64] (CZ-Verfahren).

Bei dem CZ-Verfahren wird Polysilizium unter Zugabe von Dotierstoffen (für eine p-Dotierung: Bor) in einem Quarztiegel bei Temperaturen knapp über dem Schmelzpunkt von Silizium (1.410 °C) eingeschmolzen. Der Prozess findet unter Schutzgasatmosphäre (Argon) in einer Vakuumkammer statt. Für den Schmelzprozess sind die polykristallinen Siliziumstäbe aus dem Siemensreaktor ob ihrer geometrischen Form ungeeignet, weshalb diese zuvor zerkleinert werden müssen. Polysilizium aus Wirbelschichtöfen (beispielsweise nach dem beschriebenen Verfahren von Wacker Polysilicon) kann auf Grund seiner granularen Form direkt zur Schmelze verwendet werden. Nachdem das Silizium vollständig geschmolzen ist, wird die Temperatur für die anstehenden Prozessschritte stabilisiert. In die Schmelze wird ein Impfkristall aus monokristallinem Silizium der gewünschten Kristallorientierung[65] eingetaucht. Dabei ist es wichtig, dass die Temperatur der Schmelze weder zu hoch (Impfkristall schmilzt), noch zu niedrig (Durchmesser des Impfkristalls erhöht sich durch kristallisierendes Silizium) gewählt ist. Zu Beginn des

[62] Die Produktion des Halbleitermaterials von a-Si:H-, µc-Si:H- und mikromorphen Zellen wird nicht mit betrachtet, da die Halbleiterproduktion bei diesen Technologien direkter Bestandteil der Zellenproduktion ist. Durch die bereits getroffenen Eingrenzungen liegt der Fokus sonach nur auf waferbasierten Siliziumzellentechnologien. (vgl. Kap. 4.4: „Abgrenzung des weiteren Untersuchungsrahmens“)

[63] FZ leitet sich aus der englischen Bezeichnung „Floating Zone“ ab.

[64] Nach seinem polnischen Erfinder „Jan Czochralski“ benannt.

[65] In der Photovoltaik wird eine [100]-Kristallorientierung bevorzugt, da diese eine nasschemische und anisotrope Ätze zur Zellentexturierung ermöglicht. (vgl. Kap. 3.3. „Evolution der kristallinen Siliziumsolarzelle“)

Zugprozesses wird der Impfkristall vergleichsweise schnell und unter leichter Drehbewegung aus der Schmelze gezogen, um einen dünnen Kristallhals (rund 3 mm Durchmesser) zu erzeugen. Unter Wärmeabgabe über den Impfkristall beginnt schließlich Silizium aus der Schmelze auszukristallisieren. Ziel des Vorganges ist es, einen störungsfreien Monokristall zu erhalten. Wenngleich ein störungsfreier Impfkristall eingesetzt wird, werden durch den ersten Eintauchvorgang Störstellen im Kristallgitter erzeugt. Diese würden sich über den gesamten gezogenen Kristall fortpflanzen. Durch die Erzeugung des dünnen Kristallhalses laufen diese produzierten Störstellen ob des dünnen Halsdurchmessers aus. Abbildung 4-28 zeigt eine Prinzipskizze des Vorgangs.

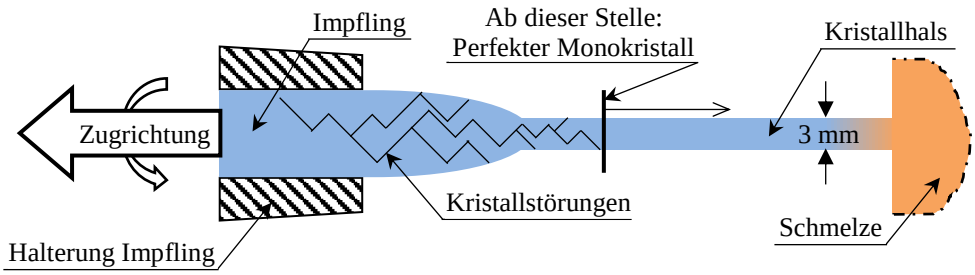


Abbildung 4-28: Impfkristall im CZ-Verfahren und Auslaufen der Kristallstörungen infolge des dünnen Kristallhalses.

Kristallstörungen verlaufen in einer kubischen Diamantstruktur, wie Silizium sie besitzt, bevorzugt in der [111]-Ebene. Wird Silizium in einer [100]-Kristallorientierung gezogen, laufen die Störstellen somit schräg zur Zugachse. Treffen diese auf die Oberfläche des Kristalls, werden sie eliminiert. Auf Grund des geringen Durchmessers des Kristallhalses ist dies schon nach wenigen Zentimetern der Fall, wodurch der Rest des Kristalls störstellenfrei gezogen werden kann. [Liaw 1990, S. 129] Anschließend wird die Zuggeschwindigkeit sukzessive verlangsamt, um den Durchmesser des gezogenen Einkristalls zu erhöhen. Während des Zugprozesses rotieren der wachsende Kristall und der Quarztiegel gegenläufig. Dies dient der Homogenisierung des Kristalls und dessen Dotierung. [MicroChemicals GmbH 2012, S. 8] Typische Durchmesser dieser gezogenen Monokristalle zur Verwendung in der Photovoltaik liegen zwischen 0,15 und 0,2 m. Dementsprechend sind Standardzuggeschwindigkeiten von 3 bis 7,2 cm je Stunde üblich. Die Länge solcher gezogenen Monokristalle ist herstellerspezifisch und variiert zwischen 40 und 150 cm. [Koch *et al.* 2003, S. 209] Erreicht der Kristall die gewünschte Länge, wird die Zuggeschwindigkeit wiederum erhöht, um den Durchmesser bis auf null zu verringern. Ein abruptes Heben des Kristalls aus der Schmelze würde Kristallfehler durch thermische Spannungen hervorrufen.

Das CZ-Verfahren ist ein etablierter industrieller Prozess. Er ist in der Literatur ausgiebig beschrieben, wie beispielsweise in [Liaw 1990].

Bedingt durch den Schmelzprozess im Quarztiegel können bei dem CZ-Verfahren Verunreinigungen in den hochreinen Siliziumkristall eingetragen werden. So sind Sauerstoffkonzentrationen von circa 10^{18} Atomen/cm³ und Kohlenstoffkonzentrationen von circa 10^{17} Atomen/cm³ für monokristallines Silizium nach diesem Verfahren typisch. [Koch *et al.* 2003, S. 211]; [MicroChemicals GmbH 2012, S. 8] Deshalb zählt monokristallines Silizium, gefertigt mittels Siemensprozess und anschließendem CZ-Verfahren, zu Silizium der SGS-Reinheitsklasse.

Im Gegensatz zum CZ-Verfahren ist das FZ-Verfahren ein „berührungsfreier" Prozess. Es wird kein Tiegel für eine Schmelze benötigt, wodurch keine weiteren Verunreinigungen in den Kristall gelangen. Zu Beginn des Verfahrens wird ein monokristalliner Impfling mit dem polykristallinem Siliziumstab aus dem Siemensprozess an dessen Boden in Berührung gebracht. Eine Induktionsspule schmilzt anschließend eine räumlich begrenzte Zone des Siliziumstabes. Beginnend vom Impfkristall kristallisiert die Schmelze nach Abkühlung in der Kristallorientierung des Impflings als monokristallines Silizium. Während die Induktionsspule und mit ihr die Schmelzzone vom Impfkristall nach oben über die gesamte Länge des polykristallinen Siliziumstabes wandert, reichern sich noch verbliebene Verunreinigungen in der Schmelze an und liegen nach Abschluss des Prozesses konzentriert am Ende des Kristalls vor. Die Dotierung des monokristallinen Siliziumstabes erfolgt über die Schutzgasatmosphäre durch gezieltes Zusetzen von B_2H_6 (Diboran), AsH_3 (Arsin), oder PH_3 (Phosphin). [MicroChemicals GmbH 2012, S. 10] Mit dem FZ-Verfahren können so EGS-Reinheiten erzielt werden. Aus diesem Grund und durch die hohen Kosten dieses Verfahrens findet dessen monokristallines Silizium kaum Anwendung in der Photovoltaik - allenfalls für Hochleistungssolarzellen in der Raumfahrt oder für Hochleistungslaborzellen wie der PERL-Zelle aus Kapitel 3.3.4: „Hocheffizienzzellen". Somit stellt der Einsatz von FZ-Silizium in Laborzellen einen entscheidenden Grund für die Minderleistung ihrer kommerziellen Ableger dar. Die folgende Abbildung 4-29 stellt das Prozessschema des CZ- und des FZ-Verfahrens abschließend bildlich gegenüber.

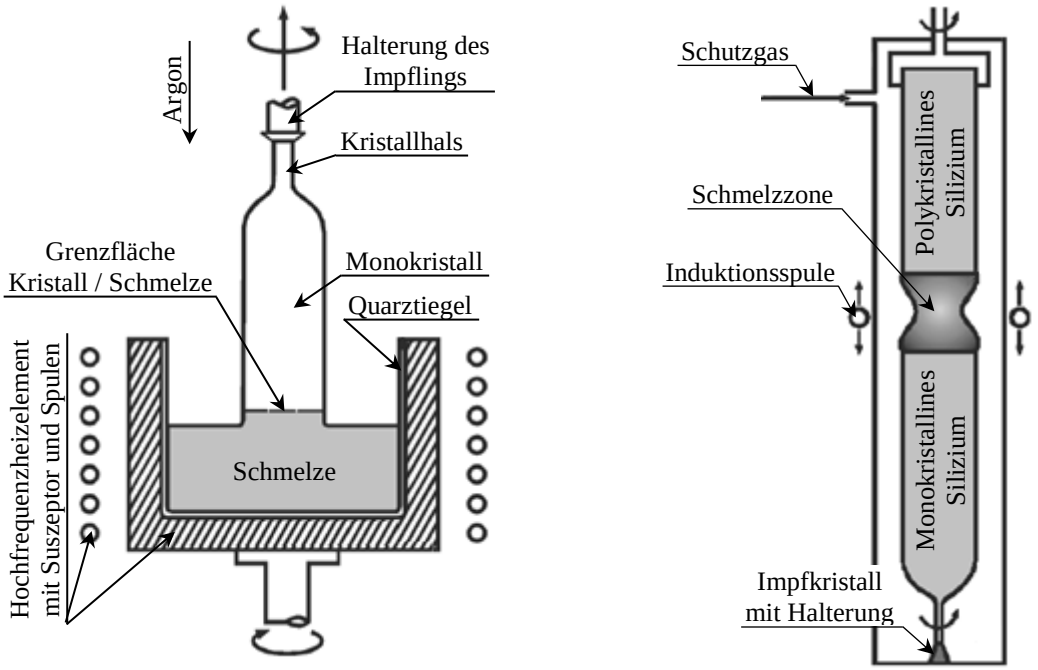


Abbildung 4-29: Herstellungsverfahren für monokristalline Siliziumstäbe. **links:** CZ-Verfahren / **rechts:** FZ-Verfahren. Abbildungen nach [Wagemann 2014, S. 4.15 und 4.17] und [Wagemann und Eschrich 2010, S. 78].

Die mittels der beiden Verfahren hergestellten monokristallinen Siliziumstäbe werden als Ingots bezeichnet. Diese werden anschließend auf den entsprechenden Durchmesser und pseudoquadratisch (abgerundete Ecken) gefräst, damit beim Einsatz in Photovoltaikmodulen ein möglichst geringer halbleiterfreier Zwischenraum bei möglichst geringem Materialverlust resultiert.

4.5.2.2.2 Multikristallines Silizium

Zur Herstellung multikristalliner Ingots gibt es derzeit zwei industriell betriebene Verfahren (Blockguss- und Bridgmanverfahren). Beide haben das Ziel, kolumnar erstarrtes multikristallines Silizium zu produzieren. Der Unterschied zwischen beiden Verfahren liegt in der Anzahl der genutzten Tiegel. Da beiden das gleiche Prinzip zugrunde liegt, wird erst an gegebener Stelle gezielt unterschieden.

Ähnlich dem CZ-Verfahren wird polykristallines Silizium zusammen mit einer definierten Menge Bor (für p-Dotierungen) in einer Gussform, einer sogenannten Kokille, eingeschmolzen. Die Kokille besteht aus Graphit und ist Innen mit Si_3N_4 (Siliziumnitrid) beschichtet. Nachdem das Silizium geschmolzen wurde, wird durch einen gezielt verfahrenstechnisch gesteuerten Abkühlungsprozess versucht, die Erstarrungsfront der Schmelze in der Kokille eben und von unten nach oben zu bewegen. An dieser Stelle tritt der Unterschied beider Verfahren zu Tage. Während beim Bridgmanverfahren die

Kristallisation im gleichen Tiegel wie der Schmelzprozess abläuft, wird beim Blockgussverfahren die Schmelze in einen zweiten Tiegel gefüllt. Da bei beiden Verfahren die Erstarrung in einer Kokille statt findet, werden sie unter dem Überbegriff „Kokillengussverfahren“ zusammengefasst.

Durch das gezielte Erstarren der Siliziumschmelze in vertikaler Richtung bilden sich zuerst am Boden der Kokille kleine Einkristalle, die seitlich bis zum Zusammenprall mit anderen Einkristallen wachsen. Wichtig ist hierbei die Steuerung der Wärmeabfuhr so zu gestalten, dass die Keimbildung der Monokristalle nur am Boden und nicht an den Kokillenwänden einsetzt. Bedingt durch den vertikalen Abkühlprozess wird anschließend ein säulenartiger Wachstumsmechanismus der Einkristalle begünstigt. Ähnlich dem FZ-Verfahren werden Verunreinigungen in der Schmelze aufkonzentriert und lagern sich an der Oberfläche des erstarrten Blockes ab. Gleichwohl werden wie beim CZ-Verfahren Kohlenstoff- und Sauerstoffverunreinigungen durch die Kokille in das multikristalline Silizium eingetragen. Die Grenzschichten der Monokristalle im multikristallinen Ingot stellen bei der späteren Solarzelle Rekombinationszentren dar. Aus diesem Grund wird versucht, die Monokristalle möglichst hoch wachsen zu lassen. Die Solarwafer werden später senkrecht zur Wuchsrichtung aus dem Ingot herausgeschnitten, damit die licht-induzierten Ladungsträgerpaare bei der vertikalen Wanderung durch die Solarzelle zum entsprechenden Pol keine Kristallgrenze durchqueren müssen.

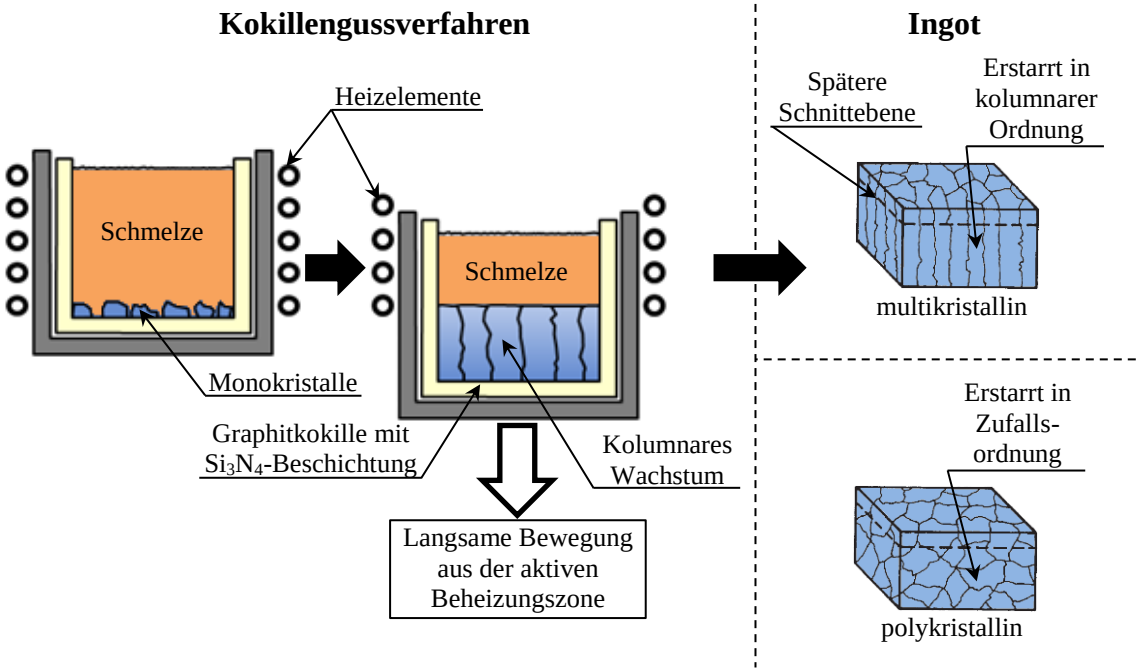


Abbildung 4-30: Kokillengussverfahren zur Herstellung multikristalliner Ingots. **links:** Kokillengussverfahren / **rechts:** Struktur multikristalline Zufallsordnung und kolumnar erstarrte Ordnung. Abbildung nach [Mertens 2011, S. 116] und [Wagemann und Eschrich 2010, S. 100].

Die Kokillenbeschichtung mit Siliziumnitrid fungiert als Antihaftbeschichtung und unterbindet so adhäsive Kräfte des Siliziumingots an den Kokillenwänden, die der Volumenausdehnung während der Kristallisation geschuldet sind und letztendlich zur Zerstörung der Kokille führen würden. [Koch *et al.* 2003, S. 214]

Beim Kokillengussverfahren handelt es sich ähnlich dem CZ-Verfahren um einen „tiegelbehafteten" Prozess zur Verbesserung der Kristallqualität. Deshalb sind auch gleichartige Verunreinigungen in der Größenordnung des CZ-Verfahrens zu erwarten. Mit dem Kokillengussverfahren lässt sich folglich maximal multikristallines Silizium in SGS-Reinheit herstellen. Typische Ingotdimensionen betragen rund 100 x 100 cm² bei einer Höhe von rund 30 cm und einem Gewicht von 800 bis 1.000 kg. Die Produktionsgeschwindigkeit (Kristallisation) liegt bei circa 1 cm Höhe je Stunde. [Koch *et al.* 2003, S. 214 und S. 216]

Die folgende Abbildung 4-31 gibt die, mittels der beschriebenen Verfahren, verschiedenen produzierbaren Siliziumarten nach Reinheit und Kristallqualität nochmals zusammenfassend an.

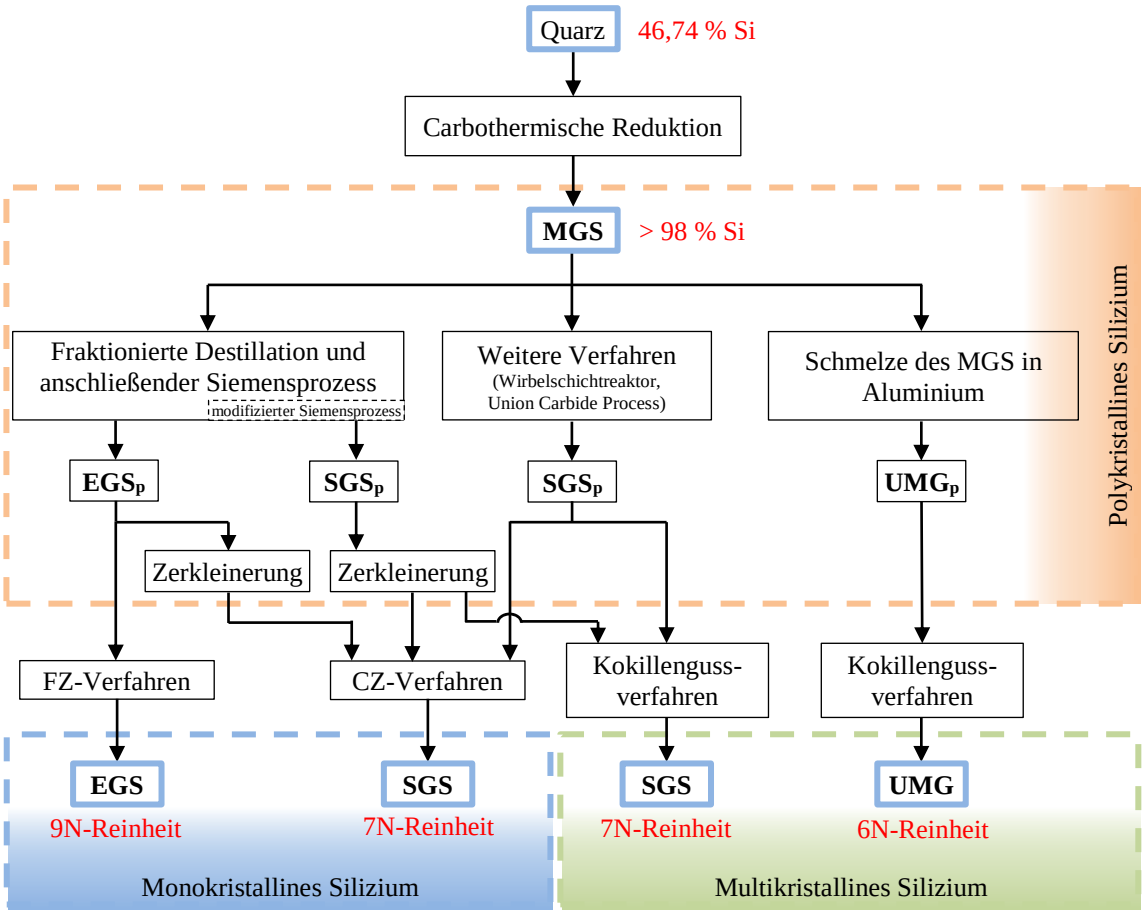


Abbildung 4-31: Übersicht der verschiedenen Siliziumklassen nach Reinheit und Kristallqualität sowie der zugehörigen Produktionsrouten.

Wenngleich aus technologischer Sicht der Einsatz von EGS in der Photovoltaik die höchsten Wirkungsgrade für Siliziumsolarzellen nach sich ziehen würde, findet in der kommerziellen Produktion von Siliziumsolarzellen hauptsächlich SGS sowohl als monokristallines als auch als multikristallines Halbleitermaterial Verwendung. Die Nutzung von UMG ist derweilen noch nicht weit verbreitet.

Mit steigender Reinheit des Siliziums ist ein steigender Energieaufwand während der Herstellung verbunden. Dies zieht in der Regel höhere Produktionskosten nach sich. Abbildung 4-32 zeigt einen ersten groben Vergleich der Herstellungskosten der verschiedenen Siliziumgüteklassen.

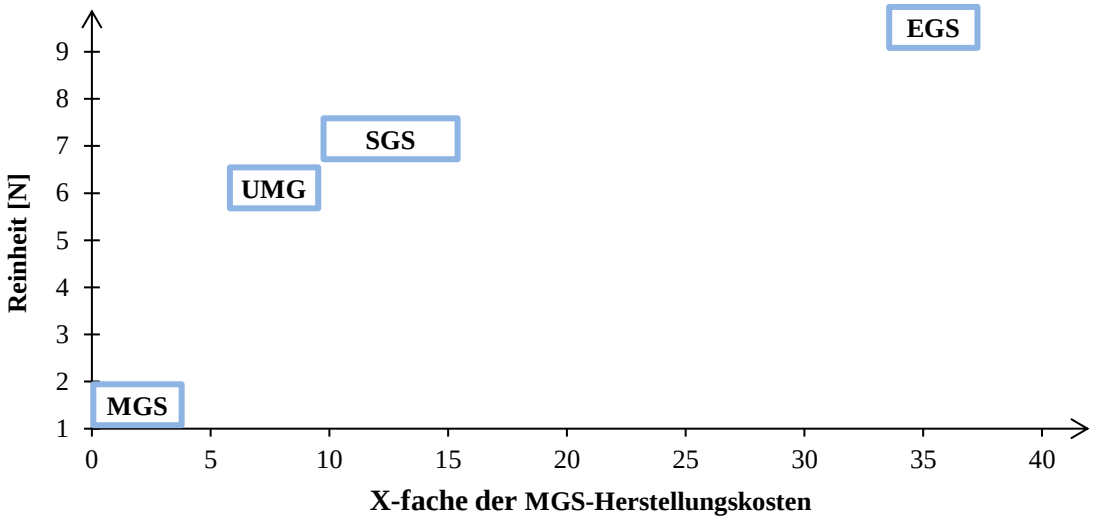


Abbildung 4-32: Grobe Einordnung der Herstellungskosten der verschiedenen Siliziumgüteklassen. Abbildung nach [Sarti und Einhaus 2002].

Für Solarzellenhersteller richtet sich die Wahl der Halbleiterqualität neben dessen Verfügbarkeit und reinheitsbedingten Wirkungsgradverlusten vor allem nach den Materialkosten. Diese beeinflussen direkt die Produktionskosten der Solarzelle. Somit stellen die Produktionskosten der Siliziumgüteklassen neben der technologischen Sicht eine entscheidende Restriktion dar. Die nachstehende Tabelle stellt die beiden Restriktionen nach den typischen Einsatzgebieten der Siliziumgüteklassen gegenüber. Wenngleich die technologische Restriktion die notwendige Bedingung für den Einsatz darstellt, muss die Wirtschaftlichkeit der Produktion gewahrt bleiben. Gleichwohl kann ein, nach ökonomischen Gesichtspunkten, sinnvoller Einsatz einer Siliziumgüteklasse nur bei erfüllter notwendiger Bedingung möglich sein. Somit bietet sich an dieser Stelle keine vollends getrennte Betrachtung an, da eine rein ökonomische Sichtweise zu Fehlinterpretationen führen würde.

Tabelle 4-15: Verwendbarkeit von Silizium in unterschiedlichen Industriezweigen in Abhängigkeit der Güteklassen nur aus technologischer Sicht sowie aus kombinierter technoökonomischer Sicht.

		Reinheit		**einsetzbar in**							
				aus technologischer Sicht				**aus technologischer und ökonomischer Sicht**			
		Abkürzung	**[%]**	**Hochleistungs-elektronik**	**Chipindustrie**	**Solarindustrie**	**Aluminium-industrie und Silikonherstellung**	**Hochleistungs-elektronik**	**Chipindustrie**	**Solarindustrie**	**Aluminium-industrie und Silikonherstellung**
Güteklasse	**EGS**	9N	99,9999999								
	SGS	7N	99,99999								
	UMG	6N	99,9999								
	MGS		> 98								

So stellt der Einsatz von EGS, SGS und UMG in der Silikonherstellung rein technologisch kein Problem, beziehungsweise keine Restriktion dar. Aus ökonomischer Sicht wäre auf Grund der hohen Herstellungskosten und der technologischen Substituierbarkeit mit MGS der Einsatz von beispielsweise SGS jedoch wirtschaftlich sinnfrei. Wie der Tabelle 4-15 ebenfalls zu entnehmen ist, stellen sich die Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Siliziumgüteklassen in der Solarbranche etwas schwieriger dar. Beim Einsatz von EGS als Halbleitermaterial gibt es einen Trade off zwischen optimalen Wirkungsgrad und Produktionskosten. EGS ist, mit geringen Wirkungsgradeinbußen, durch SGS substituierbar, wodurch sich günstigere Solarzellen mit geringfügig verringertem Wirkungsgrad produzieren lassen. Analog gilt die Betrachtung auch bezüglich des Einsatzes von UMG in der Solarbranche. UMG ist zwar billiger in der Produktion als SGS, führt aber beim Einsatz als Halbleitermaterial zu erhöhten Wirkungsgradeinbußen ob seines vergleichsweise hohen Restanteils bestimmter Elemente[66]. Eine genauere Betrachtung der zur Produktion der einzelnen Siliziumgüteklassen benötogten Stoff- und Energieströme erfolgt nachstehend, um den Aufwand untereinander vergleichen zu können, eine Grundlage für die anschließende Diskussion auf die Auswirkung in der Zellenproduktion zu schaffen und in späteren Kapiteln gezielte Gegenüberstellungen zu ermöglichen.

[66] Vgl. Tabelle 4-14, Seite 225.

4.5.2.3 Stoffliche und energetische Betrachtungen zur Siliziumaufreinigung und Ingotherstellung

4.5.2.3.1 Siliziumaufreinigung

Wie bereits dargelegt, beginnt die Herstellung von Ingots für die Phtovoltaikindustrie mit der Aufreinigung von Silizium. Den ersten Schritt stellt die carbothermische Reduktion von Quarz zu polykristallinem MGS dar. Tabelle 4-16 zeigt die wichtigsten Materialinputs und die benötigte Energie des MGS-Produktionsprozesses bezogen auf die Produktion von 1 kg MGS. Diese Daten basieren auf den entsprechenden Einzelprozessrohdaten nach [ecoinvent o.J.], welche im Anhang 4-4 hinterlegt sind.

Tabelle 4-16: Die benötigten Stoff- und Energieströme in der MGS-Produktion.

	je 1 kg MGS	Menge	Einheit	Bemerkung
Input	**Quarz**	2,7	kg	
	Energieträger, gesamt	2,82	kg	
	+ Hackschnitzel	1,35	kg	In [ecoinvent o.J.] angegeben als 23,1 MJ[67]
	+ Kohle	0,8	kg	
	+ Holzkohle	0,17	kg	
	+ Petrolkoks	0,5	kg	
	Sauerstoff[fl]	0,02	kg	
	Graphit	0,1	kg	Graphitelektrode
	Strom	11	kWh	

In der Literatur finden sich weitere Angaben zum Elektrizitätsbedarf je produziertem kg MGS. Diese schwanken von 10 kWh [Ceccaroli und Lohne 2003, S. 167], über 12 kWh [Odden *et al.* 2008, S. 3] bis 14 kWh [Wagemann und Eschrich 2010, S. 91]. Für die weitere Berechnung werden die in der Tabelle 4-16 angegebenen 11 kWh / kg MGS zugrunde gelegt. Wie in Abbildung 4-31 auf Seite 231 dargestellt, existieren verschiedene Verfahren zur weiteren Raffination von MGS. Je nach Prozessroute kann so polykristallines Silizium verschiedener Reinheiten hergestellt werden. Da sich alle weiteren Raffinationsschritte in Abhängigkeit der Qualität ihres Outputs (EGS_p, SGS_p und UMG_p)[68] im energetischen Aufwand sowie den zusätzlich benötigten Materialien, Chemikalien und verfahrenstechnischen Anlagen unterscheiden, wird im Folgenden nur auf die für die Photovoltaikindustrie wichtigsten Prozessrouten fokussiert. Zur Abgrenzung zeigt die nachstehende Abbildung deshalb die relative Verteilung der Produktionsrouten für polykristallines Silizium der Jahre 2007 und 2011 im Vergleich.

[67] Umrechnung über Faktor 28,9 MJ/kg. [Frischknecht *et al.* 2007, S. 16]

[68] Zu Gunsten einer deutlichen Abgrenzung werden die jeweiligen Reinheitsgrade für ihre polykristalline Form im Folgendem mit dem Index „p“ gekennzeichnet.

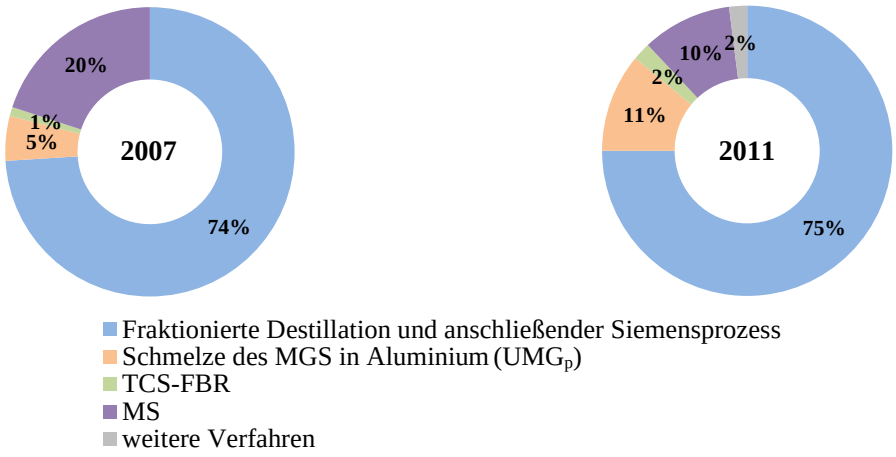


Abbildung 4-33: Gesamte Polysiliziumproduktion der Jahre 2007 und 2011 prozentual nach Technologie. Daten aus [Odden *et al.* 2008, S. 2]

Nach wie vor stellt die fraktionierte Destillation mit anschließendem Siemensprozess den Hauptprozess zur Produktion von polykristallinem Silizium dar. Wenngleich der Produktionsweg über den Siemensprozess ursprünglich zur Herstellung von polykristallinem EGS diente (und auch noch dient), fand mit der Verknappung von polykristallinem Silizium am Markt ein Umbruch statt. Seit 2004 passten eine Reihe von EGS_p-Produzenten ihre Produktionsverfahren an die Bedürfnisse der Photovoltaikindustrie an. Das Verfahrensprinzip des Siemensprozesses wurde dahingehend modifiziert, dass es den Ansprüchen von polykristallinem SGS genügt. Ein entscheidender Unterschied zum herkömmlichen Siemensprozess ist ein leicht geringerer Energieverbrauch bei geringerer Qualität des Outputs. Bereits 2005 wurden 80,2 % des Polysiliziums für die Photovoltaikindustrie nach dem modifizierten Siemensverfahren hergestellt. [Jungbluth *et al.* 2012, S. 41] Die Betrachtung der Massen- und Energieströme für die Herstellung von polykristallinem Silizium für die Photovoltaikindustrie konzentriert sich deshalb auf den modifizierten Siemensprozesses (im Folgenden als $Siemens_{mod}$ bezeichnet). Es wird lediglich an gegebener Stelle zum Zwecke des Vergleichs auf andere Verfahren eingegangen.

In der Literatur finden sich mannigfaltig energetische und stoffliche Angaben bezüglich des Siemensprozesses. Dies resultiert aus verschiedenen Verfahrenskonzeptionen mit unterschiedlichen Outputzielen. Der Hauptunterschied im Output äußert sich in einer reinen Produktion von polykristallinem Silizium auf der einen Seite und der Nutzung der nicht im Siemensreaktor abgeschiedenen Chlorsilane zur Erzeugung weiterer Produkte wie beispielsweise hochdisperser Kieselsäure (HDK) auf der anderen Seite. Wie bereits

beschrieben[69], besitzt der Siemensprozess eine Ausbeute von rund 25 % bezüglich des aus der Gasphase abgeschiedenen polykristallinen Reinsiliziums. Somit verlässt der Großteil des Siliziums den Reaktor mit den Nebenprodukten – hauptsächlich gebunden als STC. Das aus dem Siemensreaktor entweichende STC kann seinerseits prozessintern rezykliert, oder, wie beispielsweise bei der Wacker Chemie AG, zur Produktion von HDK dem Prozess entzogen werden.

Wird das STC nicht rezykliert, sondern dem Prozess zur Produktion von HDK entzogen, ergibt sich folgendes Grobschema des Prozesses (Kennzeichnung der Hauptströme wie HCl, H_2, STC und TCS_R).

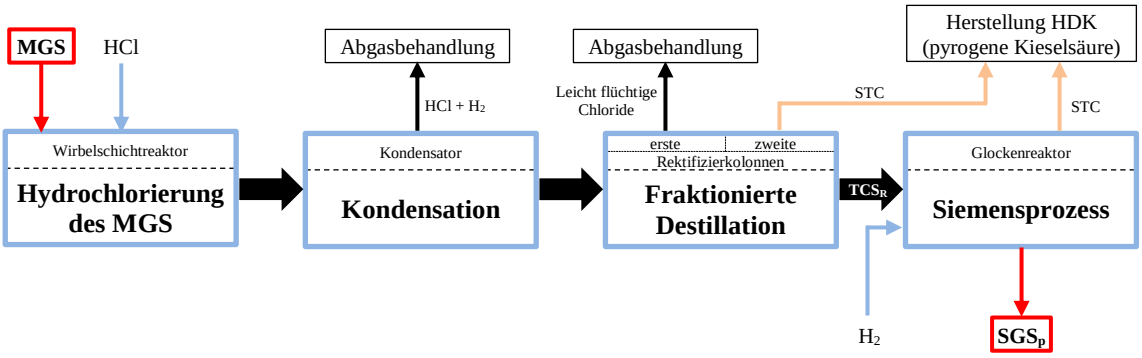


Abbildung 4-34: SGS-Herstellung ohne STC-Recycling.

Laut [Odden *et al.* 2008, S. 8f] werden bei einer derartigen Prozessführung durch die circa 25%ige Ausbeute im Siemensreaktor rund 4,4 kg MGS (entsprechen 48,8 kWh / kg SGS_p)[70] für die Produktion von 1 kg SGS_p benötigt. Hinzu kommen:

- 32 kWh / kg SGS_p für die Kondensation, die Abgasbehandlung und die fraktionierte Destillation sowie
- rund 91 kWh / kg SGSp für den Siemensprozess (dabei sind 74 kWh / kg SGSp als Verlust über die gekühlten Außenwände zu verbuchen).

Somit benötigt dieser Raffinationsschritt in der angegebenen Prozessvariante rund 123 kWh je produzierten kg SGS_p. Dieser Energiebedarf deckt sich mit anderen Angaben in der Literatur, wie beispielsweise 120 – 150 kWh / kg SGS_p [Wagemann und Eschrich 2010, S. 97] und 100 – 160 kWh / kg SGS_p [Ceccaroli und Lohne 2003, S. 175]

[69] Vgl.: Kap. 4.5.2.1.2 Trichlorsilan und Siemensverfahren – EGS-Qualität: „*Die Siliziumausbeute aus dem TCS_R während des Prozesses liegt um die 25 %.*“

[70] Ergibt sich aus der benötigten Menge MGS je kg SGS_p multipliziert mit dem energetischen Bedarf zur Herstellung eines Kilogramms MGS. Die Angabe dieses energetischen Bedarfs kann nicht direkt diesem Raffinationsschritt zugeordnet werden, wird aber der Vollständigkeit halber an dieser Stelle mit angegeben. Er dient dem späteren Vergleich der einzelnen Verfahren und ihrer kumulierten Energieströme.

Die Anpassung der verfahrenstechnischen Parameter des Abscheideprozesses im Siemensreaktor auf die Anforderungen der Photovoltaikindustrie ($Siemens_{mod}$) führte bei diesen spezialisierten Prozessen neben der energetischen Optimierung auch zu einem direkt auf die Produktion von SGS_p ausgerichteten Gesamtprozess; beispielsweise durch die Substitution der HDK-Produktion zugunsten einer erhöhten Materialeffizienz. Der Abgasstrom aus dem modifizierten Siemensreaktor wird, wie in folgender Abbildung 4-35 dargestellt, aufgetrennt und dem Raffinationsprozess wieder zugeführt.

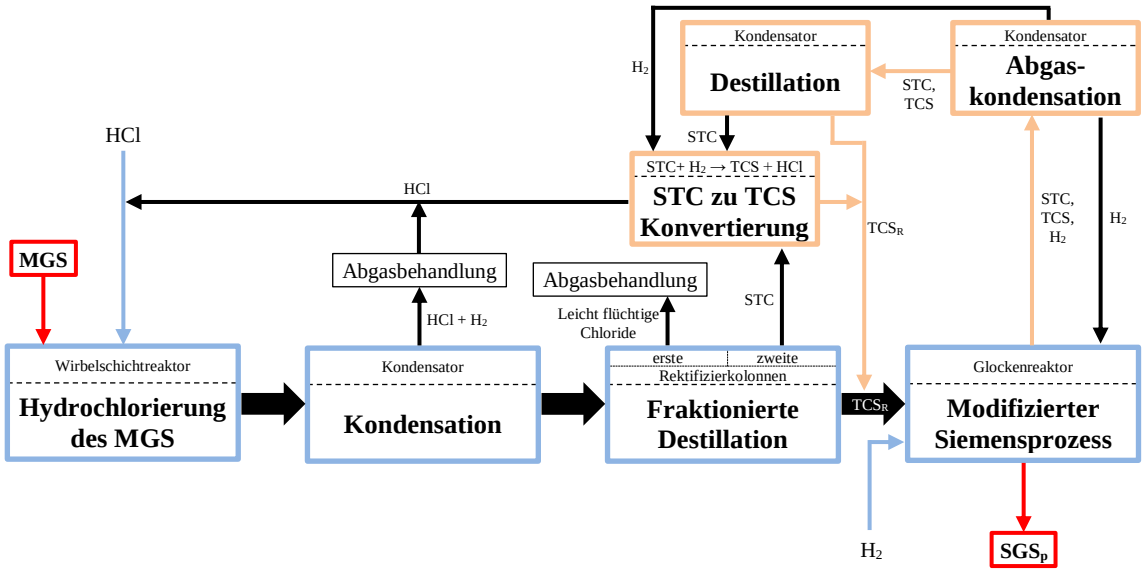


Abbildung 4-35: SGS-Herstellung mit prozessinternem Recycling.

Die prozessinterne Rezyklierung des im Siemensreaktor nicht aus der Gasphase abgeschiedenen Siliziums führt bei gleicher Ausbeute und konstanter Produktionsmenge zu einer erheblichen (um den Faktor 4) Reduktion des benötigten Ausgangsmaterials MGS. Die nachstehende Tabelle 4-17 gibt die wichtigsten Materialinputs und die benötigte Energie der MGS-Raffination zu SGS_p mittels des modifizierten Siemensprozesses inklusive der prozessinternen Siliziumrezyklierung an. Die Daten basieren wiederum auf den Einzelprozessrohdaten nach [ecoinvent o.J.], welche im Anhang 4-5 hinterlegt sind.

Tabelle 4-17: Desiderate Stoff- und Energieströme in der Produktion von polykristallinem SGS mittels des modifizierten Siemensprozesses.

je 1 kg SGS_p		Menge	Einheit	Bemerkung
Input	**MGS**	1,13	kg	4,4 kg MGS ohne Recycling
	Strom	110	kWh	
	Prozesswärme	185	MJ	Aus Erdgas [de Wild-Scholten und Alsema 2007, Register: poly Si]
	30 %ige HCl-Lösung	1,6	kg	In Summe 2 kg anorganische Chemikalien
	$Wasserstoff_{fl}$	0,05	kg	
	50 %ige Natronlauge	0,35	kg	

Entscheidend für eine spätere kumulierte energetische und materielle Betrachtung der Modulproduktion ist die Reduktion des Materialeinsatzes von MGS. Durch die gestiegene Materialeffizienz bei der Herstellung von SGS_p ergibt sich bereits an dieser Stelle bei Einbezug des vorgelagerten Prozessschrittes (MGS-Produktion) eine energetische Einsparung von:

$$Einsparung = \left(4{,}4\left[\frac{kg\ MGS}{kg\ SGS_p}\right] - 1{,}13\left[\frac{kg\ MGS}{kg\ SGS_p}\right]\right) * 11\left[\frac{kWh}{kg\ MGS}\right]$$
$$= \underline{\underline{35{,}97\left[\frac{kWh}{kg\ SGS_p}\right]}} \qquad \textbf{Formel 4-3}$$

Die Wirkung der Differenz erhöht sich weiter beim späteren Bezug auf entsprechende nachgelagerte Produktionsschritte hin zur siliziumbasierten Solarzelle.

Wenngleich der Einsatz von Wirbelschichtreaktoren (Substitution des Glockenreaktors im Raffinationsprozess) derweilen kaum erfolgt ist, wird bei einem konkreten Einsatz dieser Technologie mit energetischen Einsparungen je produzierten kg SGS_p von rund 70 % bezogen auf den energetischen Einsatz aus Tabelle 4-17 ausgegangen. [Alsema und de Wild-Scholten 2006, S. 6]

4.5.2.3.2 Ingotherstellung

Nach der Aufreinigung des Siliziums erfolgt die Anpassung der Kristallqualität. Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, wird der größte Teil des polykristallinen Siliziums für die Photovoltaikindustrie (> 80 %) über die Produktionsroute des modifizierten Siemensverfahrens hergestellt. Deshalb werden nun hauptsächlich die Material- und Energieströme der beiden Verfahren, die sich an den modifizierten Siemensprozess anschließen, betrachtet. Dafür wird nach dem gewünschten Output zur Gewinnung von monokristallinem (CZ-Verfahren) und multikristallinem (Kokillengussverfahren) SGS[71] differenziert. Die betrachtete Produktionsroute ergibt sich aus der Abbildung 4-31 auf Seite 231 und ist in der nachfolgenden Darstellung nochmals hervorgehoben.

[71] Wird im Folgendem mit den Indizes „sc“ für monokristallines (engl.: singlecrytalline) und „mc“ für multikristallines (engl.: multicrystalline) Silizium gekennzeichnet.

Bedingt durch die Marktdominanz des modifizierten Siemensprozesses wird für die sich anschließenden Berechnungen zu den entsprechenden Prozessen die vereinfachende Annahme getroffen, dass der Input von polykristallinem Silizium zu 100 % aus der gekennzeichneten Prozessroute besteht.

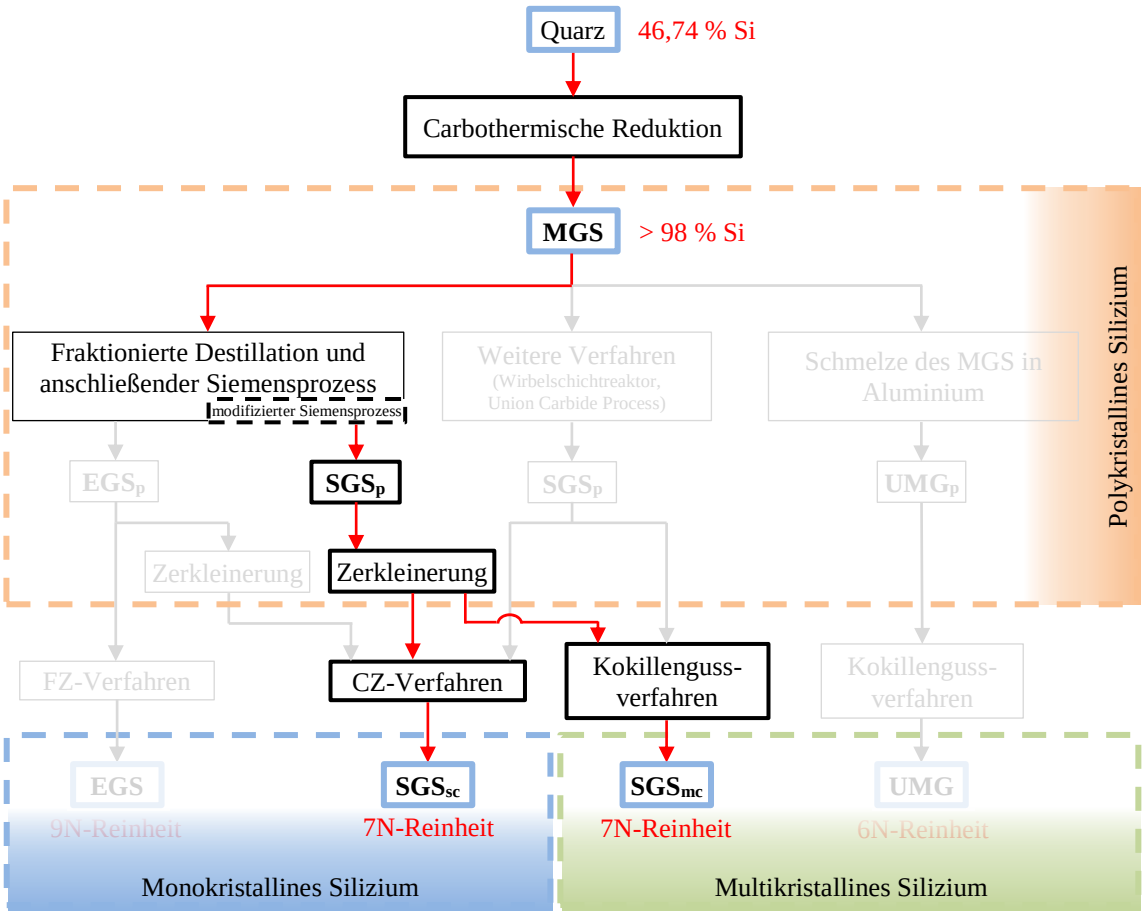


Abbildung 4-36: Betrachtungsrelevante Produktionsrouten für monokristallines und multikristallines SGS.

Bevor SGS_p aus dem modifizierten Siemensprozess für das CZ-Verfahren oder das Kokillengussverfahren verwendet werden kann, muss es ob seiner geometrischen Form zerkleinert werden. Der energetische Aufwand für den Prozessschritt Zerkleinerung ist bereits im energetischen Bedarf für die MGS-Raffination mittels des modifizierten Siemensverfahrens inklusive prozessinterner Siliziumrezyklierung (Tabelle 4-17) enthalten. Ausgangsstoff für die beiden Verfahren zur Erhöhung der Kristallqualität sind undotierte polykristalline Siliziumstückchen von maximal 7,5 cm Länge.

Für die spätere Herstellung von kristallinen Standardzellen nach dem Design der textured non-reflecting black cell werden p-dotierte Wafer benötigt. Da sowohl SGS_{sc}, als auch SGS_{mc} die direkte Basis zur Fertigung dieser benötigten Wafer darstellen, erfolgt die p-Dotierung des Siliziums während des CZ- oder des Kokillengussverfahrens.

4.5.2.3.3 CZ-Verfahren

Siliziumingots aus dem CZ-Verfahren bilden die Grundlage der Herstellung monokristalliner Solarzellen. Tabelle 4-18 zeigt die wichtigsten benötigten Material- und Energieströme für die Herstellung von SGS_{sc} mittels des CZ-Verfahrens. Die Daten basieren aus den Einzelprozessrohdaten nach [ecoinvent o.J.] und sind im Anhang 4-6 hinterlegt.

Tabelle 4-18: Stoff- und Energieströme in der Herstellung monokristalliner SGS-Ingots.

	je 1 kg SGS_{sc}	**Menge**	**Einheit**	**Bemerkung**
Input	**SGS_p**	1,07	kg	Aus $Siemens_{mod}$
	Strom	85,6	kWh	
	Prozesswärme	68,2	MJ	Aus Erdgas [de Wild-Scholten und Alsema 2007, Register: poly Si]
	$Argon_{fl}$	5,79	kg	Für Schutzgasatmosphäre
	Fluorwasserstoff	50,66	g	Für Ätzprozesse zur Reinigung des SGS_p vor dem Schmelzprozess
	50 %ige Salpetersäure	94,68	g	
	98 %ige Essigsäure	107,97	g	
	$Aceton_{fl}$	49,0	g	
	(50 %ige Natronlauge)	41,53	g	Für Abgasbehandlung

Für die p-Dotierung des Siliziums wird in den Schmelztiegel noch vor dem Schmelzprozess neben dem Ausgangsmaterial (zerkleinertes SGS_p) eine von der gewünschten p-Dotierung abhängige Menge Bor mit zugegeben. Für eine mittlere p-Dotierung[72] des Ingots berechnet sich diese Menge je eingesetzten kg SGS_p wie folgt:

$$N_{Si,Dot} = \frac{m_{Dot} * N_{Si}}{\rho_{Si}} = \frac{1{,}07[kg\ SGS_p] * (5 * 10^{22}) \left[\frac{Si\text{-}Atome}{cm^3}\right]}{2{,}33 \left[\frac{g}{cm^3}\right] * 10^{-3} \left[\frac{kg}{g}\right]} \approx 2{,}296 * 10^{25} [Si\text{-}Atome] \qquad \textbf{Formel 4-4}$$

$$\frac{N_B}{V} = \frac{N_{AV} * \rho_B}{M_B} = \frac{6{,}022136 * 10^{23} \left[\frac{1}{mol}\right] * 2{,}45 \left[\frac{g}{cm^3}\right]}{10{,}811 \left[\frac{g}{mol}\right]} = 1{,}365 * 10^{23} \left[\frac{B\text{-}Atome}{cm^3}\right] \qquad \textbf{Formel 4-5}$$

$$m_{Bor} = \frac{N_{Si,Dot} * F_{Dot} * \rho_B}{\frac{N_B}{V}}$$

$$m_{Bor} = \frac{(2{,}296 * 10^{25}) [Si\text{-}Atome] * \left(\frac{1[B\text{-}Atom]}{10^6 [Si\text{-}Atome]}\right) * 2{,}45 \left[\frac{g}{cm^3}\right] * 10^3 \left[\frac{mg}{g}\right]}{1{,}365 * 10^{23} \left[\frac{B\text{-}Atome}{cm^3}\right]} \qquad \textbf{Formel 4-6}$$

$$\underline{\underline{m_{Bor} = 0{,}412\ [mg]}}$$

m_{Dot}	$N_{Si,Dot}$	N_{Si}	N_B	N_A	ρ_S	ρ_B	V	F_{Dot}	m_{Bor}
Zu dotierende Masse	Anzahl Siliziumatome der zu dotierenden Masse	Anzahl Siliziumatome je cm^3 Reinkristall	Anzahl Boratome	Avogadro-Konstante	Dichte Silizium	Dichte Bor	Bezugsvolumen	Dotierkonzentration	Benötigte Masse Bor

[72] Entspricht 1 Akzeptor / 10^6 Siliziumatome (vgl.: Tabelle 3-5, Kapitel 3.2: „Überblick der verschiedenen Technologien“).

Es werden 1,07 kg SGS_p für die Produktion von 1 kg SGS_{sc} benötigt. Wenngleich sich die Differenz aus dem nicht anwendbaren Rest SGS_p im Quarztiegel und dem nicht zu verwendenden Kristallhals ergibt, muss eine homogene Dotierung des produzierten SGS_{sc} gegeben sein. Deshalb wurde die benötigte Menge Bor für die p-Dotierung eines kg SGS_{sc} auf die zugegebene Menge SGS_p bezogen. Somit liegt die gleiche Dotierung sowohl im fertigen Monokristall als auch in den nicht verwendbaren Produktionsresten vor.

4.5.2.3.4 Kokillengussverfahren

Für die Herstellung multikristalliner Siliziumwafer liefert das Kokillengussverfahren das benötigte Ausgangsmaterial; einen multikristallinen Siliziumingot in SGS-Reinheit. Die für das Kokillengussverfahren wichtigsten Material- und Energieströme sind in Tabelle 4-19 angegeben. Die Daten basieren auf den Einzelprozessrohdaten nach [ecoinvent o.J.], welche vollständig im Anhang 4-7 hinterlegt sind.

Tabelle 4-19: Stoff- und Energieströme in der Herstellung multikristalliner SGS-Ingots.

	je 1 kg SGS_{mc}	**Menge**	**Einheit**	**Bemerkung**
Input	**SGS_p**	1,14	kg	Aus $Siemens_{mod}$
	Strom	19,3	kWh	
	$Argon_{fl}$	0,267	kg	Für Kristallzüchtung
	$Helium_{gas}$	0,119	g	
	$Stickstoff_{fl}$	46,75	g	

Analog dem CZ-Verfahren wird dem Quarztiegel vor dem Schmelzprozess neben dem Ausgangsmaterial (zerkleinertes SGS_p) eine der gewünschten p-Dotierung entsprechende Menge Bor mit zugegeben. Diese berechnet sich ebenfalls nach den Formeln 4-4 bis 4-6. Die Bezugsmenge des SGS_p wird an die in der Tabelle 4-19 angegebene Menge SGS_p angeglichen. Zieldotierung ist die Gleiche wie beim CZ-Ingot. Für 1,14 kg SGS_p und einer Dotierkonzentration von 1 Boratom je 10^6 Siliziumatome ergibt sich die benötigte Menge m_{Bor} je kg SGS_{mc} zu 0,439 mg.

Ein erster Vergleich der beiden Verfahren zeigt einen erheblichen energetischen Mehraufwand beim CZ-Verfahren. Die benötigten Materialinputs unterscheiden sich zwar für SGS_p kaum, bei den wichtigsten Zusatzstoffen jedoch erheblich. So verbraucht das CZ-Verfahren die über 21-fache Menge Argon je kg produzierten Outputs. Diese energetischen und materiellen Nachteile des CZ-Verfahrens äußern sich jedoch in einer höheren Kristallqualität des erstellten Ingots.

4.5.3 Waferfertigung

4.5.3.1 Theoretische Grundlagen

Das Zersägen oder Schneiden der SGS_{sc}- und SGS_{mc}-Ingots in monokristalline beziehungsweise multikristalline Siliziumwafer unterscheidet sich aus technologischer Sicht nicht, weshalb beide Produktionspfade zusammen betrachtet werden sollen. Zuvor müssen beide Ingotspezifikationen jedoch ob ihrer unterschiedlichen Geometrie verschieden vorbehandelt werden.

4.5.3.1.1 Ingotpräparation

Im Falle von SGS_{sc} werden die Ingots aus dem CZ-Verfahren in kürzere Zylinder zersägt (inklusive der Entfernung von Krone und Kristallende) und je nach gewünschtem Durchmesser der daraus anzufertigenden Wafer gefräst. Zudem werden in die Zylinder sogenannte Flats eingeschliffen, um eine eindeutige Kennzeichnung der Kristallorientierung sowie der Dotierung zu gewährleisten.

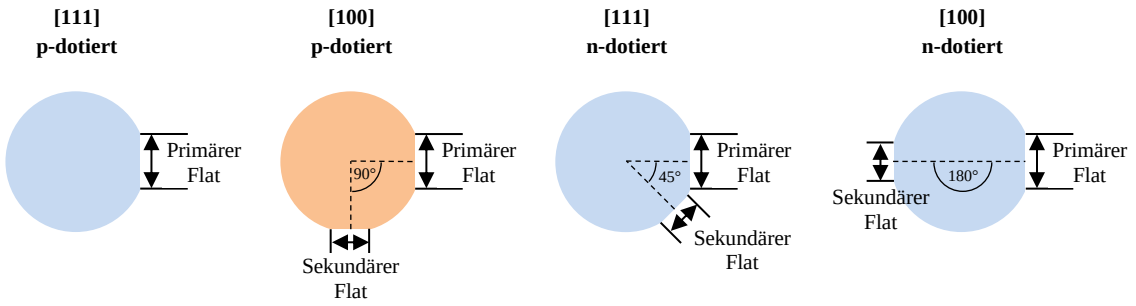


Abbildung 4-37: Kennzeichnung monokristalliner Ingots mittels Flats.

Bevor die gefrästen Ingots zu Rohwafern vereinzelt werden, wird deren zylindrische Form durch gezieltes Sägen der Ränder entlang der Ingotlänge in eine pseudoquadratische Form umgewandelt. Mit diesem Schritt reduziert sich die Oberfläche eines aus einem pseudoquadratischen Ingot hergestellten Wafers um weniger als 2 % bezogen auf einen quadratischen Wafer gleicher Dimension.

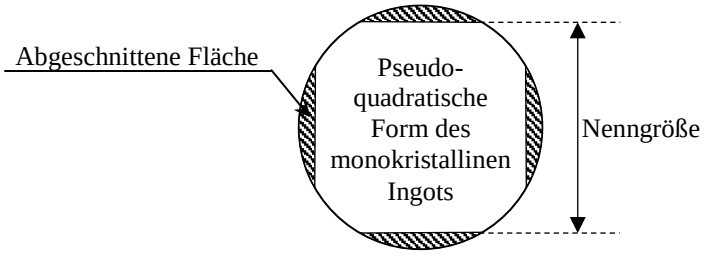


Abbildung 4-38: Pseudoquadratische Form monokristalliner Ingots mit Kennzeichnung der Nenngröße.

Dieser Schritt ist notwendig, damit bei der späteren Anordnung der Einzelzellen im Modulverbund möglichst wenig ungenutzte Fläche bei minimalem Materialverlust verbleibt. Wurden 1995 noch Nenngrößen von 100 mm und im Jahr 2000 vordergründig Nenngrößen von 125 mm gefertigt, gilt derzeit eine Nenngröße von 156 mm als industrieller Standard - jedoch sind auch beliebige und herstellerspezifische Nenngrößen durchaus üblich.

Im Falle von SGS_{mc} liegt die Ingotausbeute höher, da diese schon im rechteckigen oder quadratischen Zustand anfallen. Die multikristallinen Ingots aus dem Kokillenguss-verfahren werden ähnlich ihrer monokristallinen Pendants in quadratische Blöcke zerteilt, wobei derzeit ebenfalls eine Kantenlänge von 156 mm als industrieller Standard gilt. Jedoch geht der Trend zu größeren Ausgangsingots, um den Durchsatz des Kristalli-sationsprozesses zu erhöhen. Aktuell werden multikristalline Ingots einer Gesamtmasse von 1.000 kg im Kokillengussverfahren hergestellt, um 36 multikristalline Ziegel heraus-zuschneiden (Generation 6 Technologie)[73]. [Forstner *et al.* 2014] geht davon aus, das frühestens im Jahr 2020 ein Wechsel hin zur Generation 8 Technologie (8 x 8 Ziegel) erfolgt.

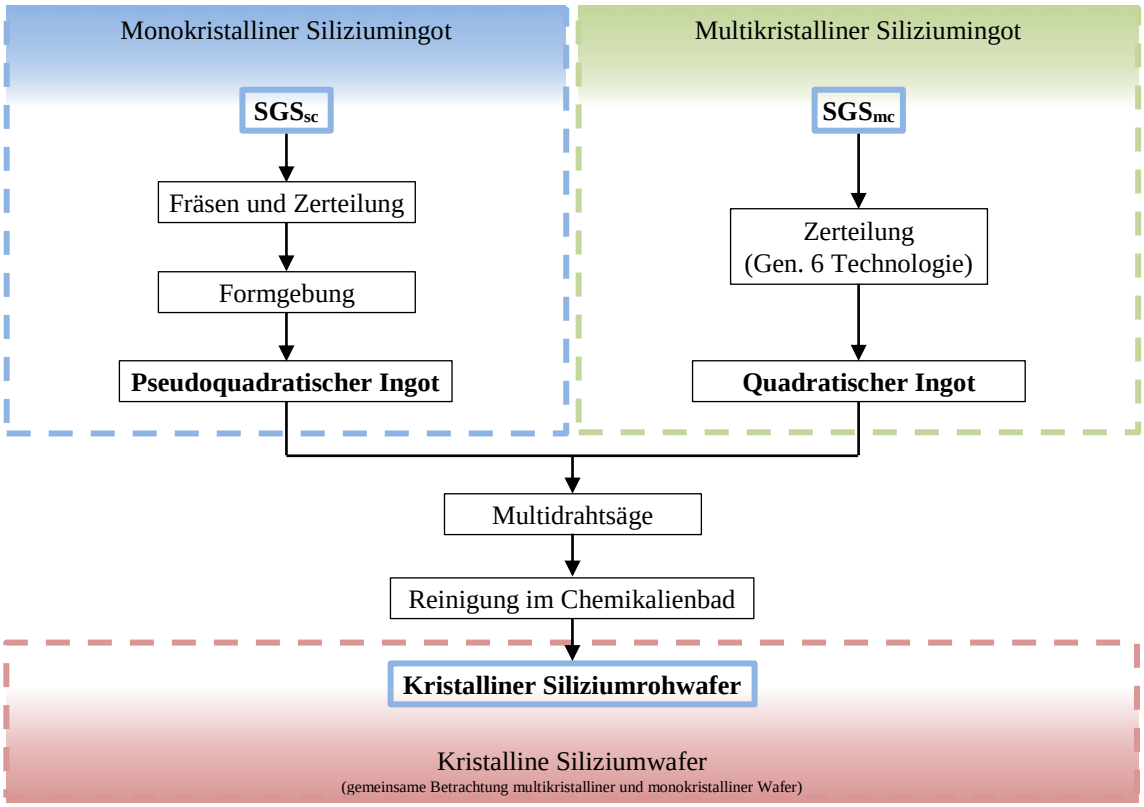


Abbildung 4-39: Prozessabfolge der Waferfertigung von der Ingotpräparation bis zum Rohwafer.

[73] Aus dem multikristallinen Ingot werden 6 x 6 Ziegel herausgeschnitten.

Abbildung 4-39 fasst die Prozessabfolge der Waferfertigung beginnend bei der unterschiedlichen Ingotpräparation für monokristallines Silizium aus dem CZ-Verfahren und multikristallines Silizium aus dem Kokillengussverfahren bis hin zum Rohwafer zur anschließenden Nachbehandlung und Zellenproduktion übersichtlich zusammen. Gleichwohl soll die Abbildung 4-39 die duale Betrachtung während der Ingotpräparation und die sich anschließende technologiebedingte singularische Beschreibung der Waferfertigung wiederspiegeln.

4.5.3.1.2 Vereinzelung zu Wafern

Nach der Ingotpräparation wird dieser auf einen Substrathalter geklebt und in einer Multidrahtsäge befestigt. Der Begriff „Multi-“ kann an dieser Stelle irreführend sein; der Apparatur wird stetig ein einzelner bronzeummantelter Edelstahldraht zugeführt. Dieser wird so über die Führungsrillen der vier Führungsrollen geleitet, dass sich ein feinmaschiges Netz aus bis zu 700 parallelen Drähten ergibt – daher die Bezeichnung „Multidraht“. Die Führungsrillen sind weiter mit einem definierten Abstand ausgeführt, welcher für die gewünschte Waferdicke ausschlaggebend ist. Die Drahtzugabe erfolgt über einen Regler, der die Drahtspannung kontinuierlich überwacht und hochpräzise steuert. Der verbrauchte Sägedraht wird schließlich über eine zusätzliche Spule wieder aufgenommen und dem Prozess entzogen. Das Prinzip dieses Sägeprozesses ist in der folgenden Abbildung 4-40 zur Verdeutlichung nochmals dargestellt.[74]

Das aufgespannte Sägedrahtnetz wird über das von der Hauptantriebs- und Nebenantriebsrolle erzeugte Drehmoment angetrieben. Während des Sägeprozesses wird der Siliziumingot gegen den Sägedraht gedrückt und so gleichzeitig in mehrere hundert Einzelwafer zerteilt. Wie in der Abbildung 4-40 dargestellt, bewegt sich der Sägedraht beim Schneidprozess stetig in eine Richtung. Der Vorteil gegenüber einem oszillierenden Prozess liegt in einer höher möglichen Drahtgeschwindigkeit von bis zu 20 m/s. Nachteil sind jedoch rauere Oberflächen der geschnitten Wafer. Je nach Drahtgeschwindigkeit und Anzahl der parallelen Schnitte kann die Gesamtlänge des Sägedrahts bis zu 500 km betragen. Der Sägeprozess mittels einer Multidrahtsäge kann mit unterschiedlichen, den Abrieb betreffenden, Spezifikationen erfolgen, wobei hauptsächlich zwei Variationen zum Einsatz kommen: ein mit Diamantsplittern besetzter Draht oder die Zugabe einer mit

[74] Der Sägeprozess mittels einer Multidrahtsäge stellt eine der wenigen Technologien dar, die in der Photovoltaikindustrie entwickelt und erfolgreich auf die Halbleiterindustrie transferiert wurde.

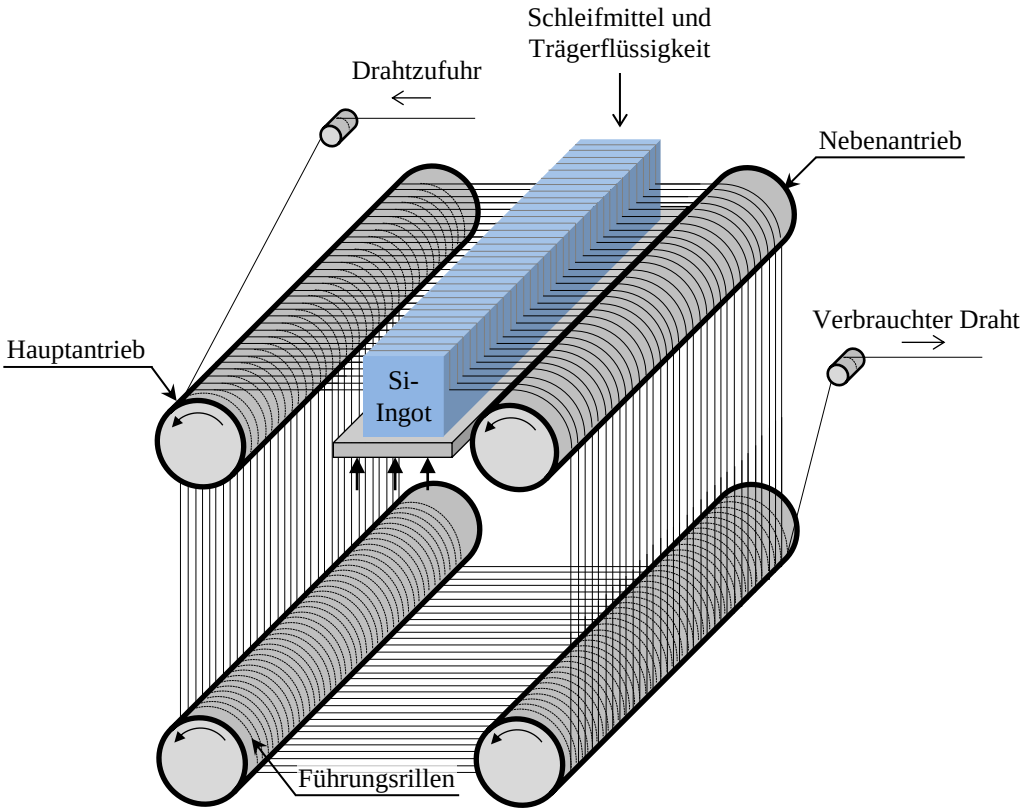


Abbildung 4-40: Schema der Wafervereinzelung mittels einer Multidrahtsäge.

Abrasivpartikeln versetzten Suspension über eine Düse, welche über den Sägedraht in die Schnittflächen transportiert wird. Dafür werden entweder ebenfalls Diamantsplitter oder feine Körnchen aus Siliziumcarbid (SiC) verwendet.[75] Die Suspension besteht neben den Abrasivpartikeln aus einer hochviskosen Trägerflüssigkeit, welche unterschiedlichsten Aufgaben und Voraussetzungen genügen muss. Hauptaufgabe der Trägerflüssigkeit ist der Transport der Abrasivpartikel in den Sägespalt des Siliziumingots unter Verhinderung einer Partikelagglomeration. Der eigentliche Sägeprozess wird im Sägespalt des Siliziumingots durch die mechanische Bewegung des Sägedrahts und damit die kontinuierliche Interaktion der Abrasivpartikel mit der Siliziumoberfläche bewirkt. Es handelt sich somit vielmehr um einen Schleif- und Läppvorgang. Das Sägeverhalten ist abhängig von Faktoren wie der Kraftübertragung zwischen Sägedraht und Kristall als Funktion der Drahtspannung, sowie der Drahtgeschwindigkeit, der Hebegeschwindigkeit des Kristalls, der Verteilung der Partikeldurchmesser sowie deren Formgebung, der Konzentration des Siliziumcarbids in der Suspension und der Viskosität der Suspension. Die Viskosität ist wiederum selbst von den Prozessparametern Temperatur, Verschmutzung durch abge-

[75] Knapp 90 % aller Multidrahtsägeprozesse verwenden eine Suspension mit Siliziumcarbid als Abrasivpartikel, weshalb die nachstehenden Betrachtungen zum Sägeprozess sich auf diese Form konzentrieren.

riebenes Eisen vom Sägedraht und der Abrasivpartikelkonzentration abhängig, wobei die Temperatur eine zu regelnde Prozessvariable darstellt. Eine Kühlung des Sägeprozesses ist notwendig, da die Interaktion der Partikel mit der Siliziumoberfläche sonst eine Temperaturerhöhung und damit eine unerwünschte Änderung der Viskosität der Suspension bewirken würde. In den meisten Fällen wird eine auf Öl basierende Trägerflüssigkeit (PEG)[76] genutzt, wodurch sich ein erheblicher Reinigungsaufwand der vereinzelten Wafer nach dem Sägeprozess ergibt. Weiter können die Wafer nach dem Sägeprozess „verkleben", wodurch eine erhöhte Bruchgefahr bei der nachfolgenden Vereinzelung der Wafer besteht.[77] Derzeit sind aber auch wasserlösliche / aus einer Wasserbasis bestehende Trägerflüssigkeiten in der Erprobung. Nachteil dieses Ansatzes ist die Entstehung eines explosionsfähigen Gases durch die Wechselwirkung von Wasser und Silizium während des Sägeprozesses. Beim Sägevorgang selbst entsteht ein abrasiver Materialverlust je Schnittfläche, welcher vom Sägedrahtdurchmesser und der Größenverteilung der Abrasivpartikel abhängig ist. Typische Drahtdurchmesser von 120 µm und Durchmesser der Abrasivpartikel zwischen 5 und 30 µm führen beispielsweise zu einem Materialverlust je Schnittfläche von 130 bis 170 µm. Vereinfachend soll für die weiteren Berechnungen somit ein abriebbedingter Materialverlust von 140 µm Dicke je Schnitt angenommen werden. Dieser Abrieb an hochreinem $SGS_{sc/mc}$ fällt durch die Mischung mit den Abrasivpartikeln (SiC) und der Trägerflüssigkeit (PEG) stark verunreinigt an und kann mit dem jetzigen Stand der Technik in dieser Form nicht wirtschaftlich recycelt werden.[78] Bei einer standardisierten Waferdicke von 180 µm [Forstner *et al.* 2014] beträgt der Materialverlust je Wafer unter der vorangegangenen Annahme rund 43 %. Diese Problematik und die damit einher-gehenden Materialverluste führen in der Industrie zu zwei Lösungsansätzen. Zum einen werden dünnere Sägedrähte (Durchmesserreduzierung auf 100 µm) und kleinere Abrasiv-partikel erprobt, was eine Reduktion des abrasiven Materialverlustes je Schnittfläche zur Folge hat. Zum anderen gibt es Bestrebungen auf die mit Abrasivpartikeln versetzte Suspension während des Sägeprozesses zu verzichten und einen mit Diamantsplittern besetzten Sägedraht zu verwenden. Laut [Forstner *et al.* 2014] ist jedoch frühestens 2020 mit einem Wechsel der Prozessspezifikation hin zur Verwendung eines mit Diamantsplittern besetzten Sägedrahts zu rechnen.

[76] Polyethylenglycol ($C_{2n}H_{4n+2}O_{n+1}$) – meist als Triethylenglycol (TEG).

[77] Mit zukünftig sinkender Waferdicke verstärkt sich dieses Problem.

[78] PEG und Siliziumcarbidpartikel werden indes teilweise recycelt.

Vorteil des Einsatzes eines mit Diamantsplittern besetzten Sägedrahtes ist in erster Linie die Substitution der Trägerflüssigkeit durch eine wässrige Tensidlösung und die Absenz der zusätzlichen Abrasivpartikel aus Siliziumcarbid, wodurch der Abrieb einer wesentlich geringeren chemischen Kontamination unterliegt und damit einfacher recycelbar wäre. Wie der nachstehenden Tabelle 4-20 zu entnehmen ist, sind weitere Vorteile dieser alternativen Prozessspezifikation eine erhöhte Drahtlebensdauer, geringere Kosten der benötigten Flüssigkeit und eine höhere Schneidegeschwindigkeit. Nachteilig sind die höheren Drahtkosten je laufender Kilometer sowie höhere Nachbearbeitungskosten infolge einer schlechteren Oberflächenbeschaffenheit der Schnittkanten der gefertigten Wafer mit einer erhöhten Anzahl von Mikrorissen.

Tabelle 4-20: Parameter unterschiedlicher Spezifikationen des Multidrahtsägeprozesses. Daten aus [Goodrich *et al.* 2013].

		Standardprozess	**Diamantbesetzter Draht**
Parameter	**Drahtdurchmesser**	120 µm	120 µm
	Abrasiver Materialverlust je Schnitt	~ 140 µm	~ 140 µm
	Schnittgeschwindigkeit	22,2 mm/h	66 mm/h
	Kosten Flüssigkeit	$\$_{2013}$ 1,40 – 2,00 je kg (SiC in PEG)	$\$_{2013}$ 0,39 je m³ (wässrige Tensidlösung)
	Drahtkosten je laufender km	$\$_{2013}$ 2,80	$\$_{2013}$ 5,60
	Drahtlebensdauer (cm² produzierte Wafer je Meter Draht)	24	80

Die Wahl der Prozessparameter während des Sägeprozesses beeinflusst die Güte des Outputs und damit die Höhe der Kosten einer notwendigen Nachbehandlung. Gütekriterien sind beispielsweise das Bruchverhalten der Wafer; Länge, Dichte und Verteilung möglicher Oberflächenschäden; Rauheit der Waferoberfläche; Variation der Waferdicke über die gesamte Länge und der Verschmutzungsgrad. Abbildung 4-41 zeigt beispielhaft die Topologie eines unbehandelten, frisch geschnittenen Wafers inklusive der Variation der Waferdicke. Weiter zeigt die Abbildung anschaulich die sich aus der Biegung des Sägedrahtes (aufgrund der Kräfte beim Sägeprozess) ergebenden bogenförmigen Schnittfurchen.

Für weiterführende Informationen bezüglich möglicher Oberflächenschäden der Wafer durch den Sägeprozess sowie näheren Betrachtungen zu Mikrorissen und mikroskopischen Vorgängen in der Schnittzone wird der interessierte Leser an dieser Stelle auf [Koch 2003, S. 226ff] verwiesen.

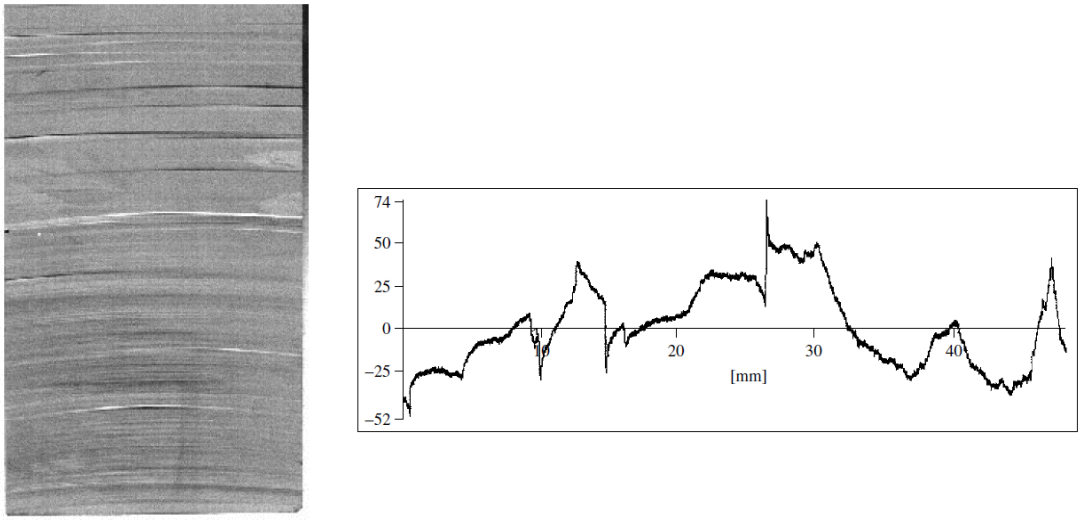


Abbildung 4-41: Topologie der Schnittoberfläche eines unbehandelten Wafers. Quelle [Koch *et al.* 2003, S. 229]

Für die sich anschließende stoffliche und energetische Betrachtung zur Waferfertigung ist folgender Prozessoutput aus dem Sägevorgang festzuhalten:

- Wafer einer Grundfläche von 15,6 cm x 15,6 cm (entspricht 243,36 cm²)[79],
- eine einheitliche Waferdicke von 180 µm,
- Einsatz eines Multidrahtsägeprozesses unter Verwendung einer Suspension aus PEG und Siliziumcarbid als Abrasivpartikel,
- ein abrasiver Materialverlust je Schnittfläche von 140 µm Breite und
- Verschmutzung der Waferoberfläche durch Prozessadditive inklusive Oberflächenschäden.

Wenngleich dünnere Wafer mit einer Dicke bis zu 100 µm produzierbar sind, findet deren Herstellung keine Anwendung, da deren Handling mit dem derzeitigen Stand der Technik nicht zu bewerkstelligen ist. Dünnere Wafer würden in der gesamten nachgelagerten Produktionskette zu einem erhöhten Ausschuss durch Bruchschäden führen. Weiterführende Diskussionen diesbezüglich finden sich im Kapitel 5.5.2 ab Seite 618.

Nachdem die Wafer vereinzelt wurden, werden ihre Oberflächen in einem Chemikalienbad aus Natriumhydroxid (NaOH), Essigsäure ($C_2H_4O_2$), Chlorwasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff (HF) und Dipropylenglycolmethylether[80] ($C_7H_{16}O_3$) von verbliebenen organischen und anorganischen Resten gesäubert, welche von der für den Sägeprozess notwendigen Suspension stammen.

[79] Die Grundfläche wird sowohl für monokristalline und multikristalline Wafer gleich angenommen, da der Flächenverlust bei monokristallinen Wafern ob ihrer pseudoquadratischen Form unter 2 % liegt.

[80] Kurz: DPM

4.5.3.2 Stoffliche und energetische Betrachtungen

Wenngleich sich Säge- und Vereinzelungsprozess monokristalliner und multikristalliner Siliziumwafer aus technologischer Sicht entsprechen, unterscheiden sich beide Prozesse in ihrem Input und in vorgelagerten Aufbereitungsschritten.

Wie bereits dargelegt, werden für die Fertigung von monokristallinen Wafern die jeweiligen monokristallinen Ingots vorab in eine gleichmäßige pseudoquadratische Form gebracht. Dazu werden die Krone, das Kristallende und die Seiten entfernt. Dieser Verschnitt wird in, für das Czochralskiverfahren übliche, Stückchen zerkleinert und mittels einer chemischen Wäsche von nativen Oxiden (entstehen während die Siliziumstücken Luft ausgesetzt sind) befreit, sodass er in späteren Czochralskiprozessen rezykliert werden kann. Ebenso werden Teile der Prozessadditive (PEG und Siliziumcarbid) recycelt. Der abrasive Materialverlust während der Aufbereitungsschritte des monokristallinen Ingots und die abrasiven Materialverluste während des Sägeprozesses (Multidrahtsäge mit PEG und Siliziumcarbid) finden indes ob deren chemischen Kontamination keine weitere Verwendung. [Goodrich *et al.* 2013, S. 115] Bei der Herstellung multikristalliner Siliziumwafer fallen infolge der Generation 6 Technologie ebenfalls ungenutzte Seiten als Verschnitt an, welche analog der Rezyklierung der monokristallinen Verschnittreste einer Nachbehandlung unterzogen und späteren Kokillengussprozessen zugegeben werden.

Da die Waferdicke (180 µm) und Waferfläche (15,6 cm x 15,6 cm) für beide Kristallqualitäten industrieller Standard sind und sich der Säge- und Vereinzelungsprozess sowie die nachträgliche Waferreinigung technologisch nicht unterscheiden, gelten nachstehende Betrachtungen, Berechnungen und Angaben in gleichem Maße für die multikristalline und monokristalline Waferfertigung. Betrachtungsrelevante Unterschiede werden gesondert gekennzeichnet.

Die Menge an benötigtem Silizium je Quadratmeter geschaffener Waferfläche ist abhängig von der Waferdicke und der Menge des abrasiven Materialverlustes je Schnittfläche. Die Oberfläche der Wafer ist über die Deckfläche der eingesetzten Siliziumingots definiert. Für diese gelten die Kantenabmessungen von 15,6 cm x 15,6 cm derzeit als industrieller Standard, woraus sich eine einseitige Waferoberfläche von 243,36 cm² ergibt. Da ein Rohwafer einzig aus Silizium des Ausgangsingots besteht, entspricht die Menge an enthaltenen $SGS_{sc/mc}$ seinem Gewicht.

Für einen Rohwafer mit der Grundfläche von 243,36 cm² und einer standardisierten Dicke von 180 µm berechnet sich die direkt enthaltene Menge $SGS_{sc/mc}$ beziehungsweise sein Gewicht (m_{Wafer}) aus dem Produkt der Wafergrundfläche (A_{Wafer}), der Waferdicke (d_{Wafer}) und der Dichte von Silizium (ρ_{SGS}) zu:

$$\begin{aligned} m_{Wafer} &= A_{Wafer} * d_{Wafer} * \rho_{SGS} \\ &= 243{,}36\ [cm^2] * 0{,}018\ [cm] * 2{,}33\ \left[\frac{g_{SGS}}{cm^3}\right] \\ &= \underline{\underline{10{,}2\ \left[\frac{g_{SGS}}{Wafer}\right]}} \end{aligned}$$

Formel 4-7

Dies entspricht einer Menge an $SGS_{sc/mc}$ je Quadratmeter Wafer von 419,4 g SGS. Da für die Herstellung eines Wafers aber auch der nicht recycelbare abrasive Materialverlust von 140 µm je Schnittfläche mit einberechnet werden muss, wird dieser auf die Waferdicke addiert. Es ergibt sich somit eine gesamt benötigte Menge $SGS_{sc/mc}$ je produzierten Quadratmeter Wafer von 745,6 g SGS oder 18,14 g SGS je Wafer. Tabelle 4-21 zeigt zusammenfassend die wichtigsten Materialinputs und die benötigte Energie für die Herstellung von 1 m² gereinigtem Siliziumrohwafer. Exklusive der Angabe der benötigten Menge SGS[81] basieren die Daten auf den entsprechenden Einzelprozessrohdaten nach [ecoinvent o.J.], welche im Anhang 4-8 vollständig hinterlegt sind.

Tabelle 4-21: Stoff- und Energieströme in der Herstellung kristalliner Siliziumrohwafer.

je m² kristalliner Wafer		Menge	Einheit	Bemerkung	
Input	**$SGS_{sc/mc}$**	0,7456	kg	0,4194 kg ohne abrasiven Mat.-verlust	
	Strom	8,0	kWh		
	Prozesswärme	4,0	MJ	Aus Erdgas, für Waferreinigung	
	Siliziumcarbid	0,49	kg	Wafervereinzelung	+ 2,14 kg aus Recycling (Σ = 2,63 kg)
	PEG (TEG)	0,11	kg		+ 2,60 kg aus Recycling (Σ = 2,71 kg)
	Acrylbindemittel (34 % in H_2O)	2,0	g		Kleber für Befestigung Ingot auf Substrathalter
	Glaswolle	10	g		Substrathalter
	Sägedraht, gesamt	1,49	kg		
	+ Stahl	1,4826	kg		
	+ Messing	7,4	g		
	Natriumhydroxid	15	g	Reinigung	50 %-ige wässrige Lösung
	Chlorwasserstoff	2,7	g		30 %-ige wässrige Lösung
	Essigsäure	39	g		98 %-ige wässrige Lösung
	DPM	300	g		

[81] Die Neuberechnung dieser Daten war aufgrund des sich geänderten industriellen Standards der Waferabmessungen notwendig.

4.5.4 Produktion kristalliner Siliziumsolarzellen

4.5.4.1 Theoretische Grundlagen

Ähnlich der Vereinzelung der Wafer mittels des Multidrahtsägeprozesses unterscheidet sich die weitere Produktion hin zu einer Solarzelle aus mono- und multikristallinem Silizium nur marginal. Die nachstehenden Betrachtungen gelten infolgedessen wiederum für beide Kristallqualitäten in gleichem Maße, weshalb nur an gegeben Stellen auf die wesentlichsten Unterschiede hingewiesen wird.

Solarzellen sind die stromerzeugenden Komponenten eines Photovoltaikmoduls, deren Funktionsweise auf der Nutzung der lichtinduzierten Ladungsträgertrennung basiert.[82] Für diesen Vorgang ist jedoch neben einer solaren Strahlungsexposition ein unsymmetrisch dotierter pn-Übergang eines geeigneten Absorptionsmaterials nötig. Wenngleich die gereinigten kristallinen Siliziumrohwafer bereits p-dotiert vorliegen, fehlt ihnen der entsprechend dotierte Emitter. Die Implementation eines Emitters ist grundlegende Voraussetzung für die Herstellung einer funktionstüchtigen Solarzelle und deshalb eines der zentralen Produktionsschritte während der Solarzellenfertigung. Gleichwohl sind zur Realisierung adäquater Wirkungsgrade kristalliner Siliziumsolarzellen zusätzliche Produktionsschritte wie eine Oberflächentexturierung, eine Oberflächenpassivierung, ein Back-Surface-Field et cetera notwendig[83].

Nachstehende Abbildung 4-42 zeigt eine typische Abfolge der Produktionsschritte zur Herstellung einer Standardsiliziumsolarzelle aus einem kristallinen Siliziumrohwafer. Da das Gros der Produzenten die dargestellte Sequenz nutzt [Szlufcik *et al.* 2012], [Goodrich *et al.* 2013] und [Tobías *et al.* 2003], kann diese als industrieller Standard angesehen werden und stellt deshalb gleichzeitig die Grundlage der weiteren Betrachtung dar.

[82] Vgl. Kapitel 3.1: Der photovoltaische Effekt

[83] Vgl. Kapitel 3.3.5: Betrachtungen zum Wirkungsgrad kristalliner Siliziumsolarzellen

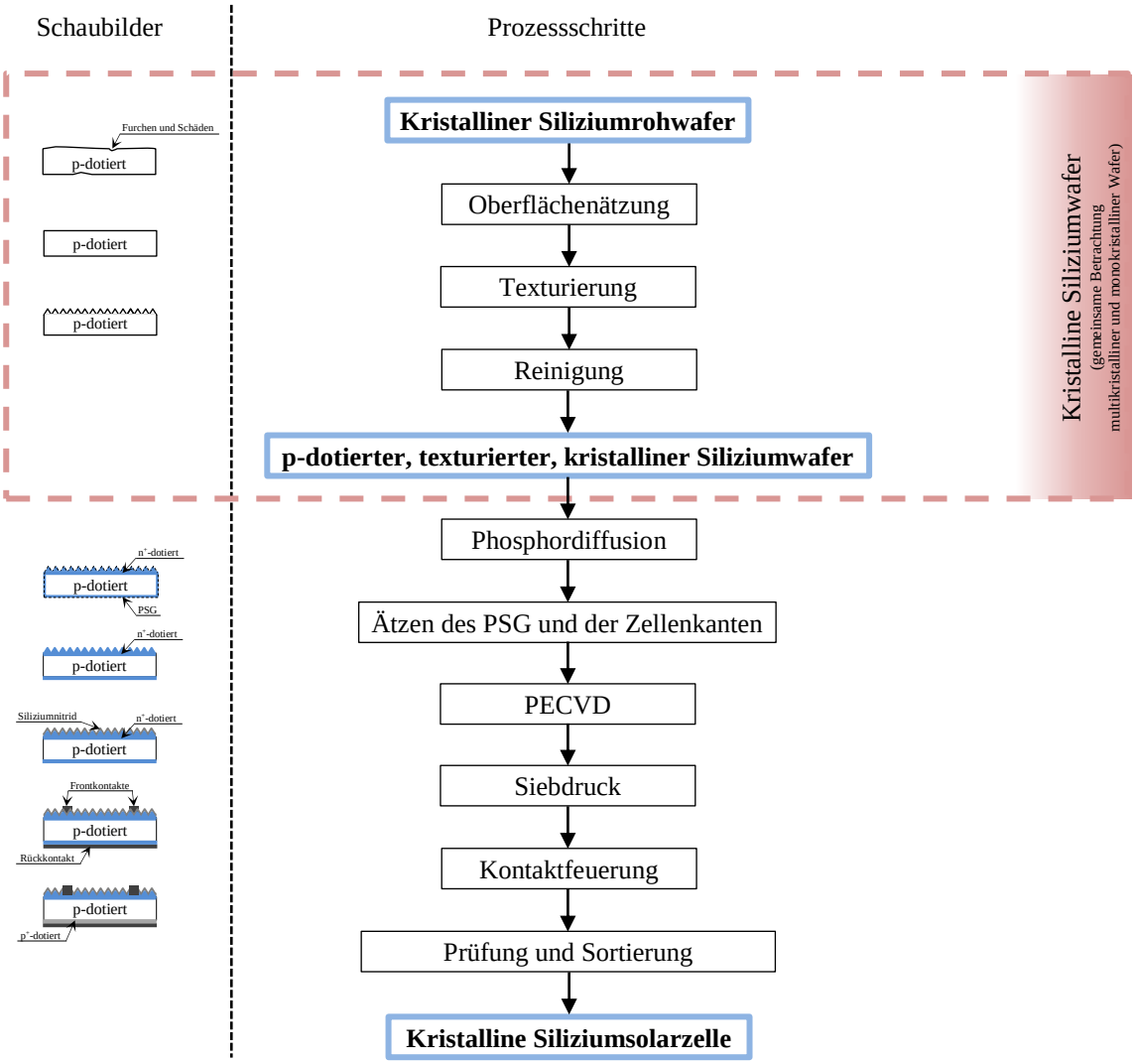


Abbildung 4-42: Typische Sequenz der Herstellung einer Standardsiliziumsolarzelle aus einem kristallinen Siliziumrohwafer.

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, gilt die Bezeichnung Wafer bis zur Herstellung eines pn-Übergangs, da erst ab diesem Schritt die grundlegende Funktion einer Solarzelle ermöglicht wird. Alle vorangegangenen Prozessschritte, wie die Oberflächenätzung und die Texturierung, wirken sich zwar erheblich auf die Funktionsfähigkeit der fertigen Solarzelle aus, stellen aber nicht wie der pn-Übergang eine notwendige Funktionsbedingung dar. Aus diesem Grund ist die Spezifikation „p-dotierter, texturiert, kristalliner Siliziumwafer“ auch gesondert als Zwischenprodukt gekennzeichnet. Neben der Darstellung der Prozesssequenz findet sich weiter eine vereinfachte Abbildung eines Querschnittes des Wafers / der Zelle unter Angabe der prozessspezifischen Auswirkung auf dessen / deren Aufbau infolge des jeweils letzten Prozessschrittes.

Die von organischen und anorganischen Resten aus dem Sägeprozess gesäuberten kristallinen Siliziumrohwafer werden vor den weiteren Behandlungsschritten auf ihre Dimensionierung und die Stärke der Oberflächenschäden hin geprüft, welche eine Folge des hoch abrasiven Multidrahtsägeprozesses sind (vgl. Abbildung 4-41, Seite 248). Eine geschädigte Waferoberfläche kann in beleuchteten Solarzellen zu verstärkten Elektron-Loch-Rekombinationen führen und so die Effizienz der fertigen Solarzelle schmälern. Weiter erhöhen solche Oberflächenschäden und Mikrorisse die Bruchgefahr der Wafer während der Zellenproduktion. Aus diesen Gründen werden, in Abhängigkeit der Tiefe der Oberflächenschäden, in einem Chemikalienbad zwischen 5 und maximal 15 µm von jeder Waferseite weggeätzt. Die eingesetzte Ätzflüssigkeit besteht aus einer wässrigen Lösung mit 20 bis 30 Gew.-% Natriumhydroxid (NaOH) oder Kaliumhydroxid (KOH) und wird auf 80 – 90 °C erhitzt. Die Kontrolle der Temperatur, welche durch die exotherme Reaktionsnatur der alkalischen Lösungen erforderlich ist, und die Dauer der Behandlung sind entscheidende Prozessparameter um die Bildung möglicher Korngrenzen zu unterbinden.

Nachdem die Oberflächenschäden „ausgeätzt“ wurden, besitzen die Wafer eine planare Oberfläche, welche jedoch rund 35 % des einfallenden Lichtes reflektiert. Wie bereits im Kapitel 3.3: „Evolution der kristallinen Siliziumsolarzelle“ beschrieben, existieren verschiedene technische Maßnahmen um die Reflexionsrate auf bis zu drei Prozent zu senken. Eine Möglichkeit stellt die Texturierung der Waferoberfläche dar. Monokristalline Siliziumwafer mit einer [100]-Kristallorientierung werden dazu bei 80 °C circa 15 Minuten lang mit einer wässrigen Lösung aus 2 Gew.-% Natriumhydroxid oder mit Kaliumhydroxid unter Isopropanolzusätzen behandelt. Unter kontrollierten und optimalen Prozessbedingungen ergibt sich eine zufällig verteilte Struktur an der Waferoberfläche aus spitz zulaufenden Pyramiden (Winkel in der Spitze: 70,5°) einer quadratischen Grundfläche mit Höhen zwischen 3 und 5 µm. Die wichtigen Prozessparameter wie geeignet vorbereitet Oberflächen, konstante Temperaturen sowie eine präzise Dosierung der Lösung unter einer optimalen Isopropanolkonzentration birken ein hohes Fehlerpotenzial in sich. Mögliche Konsequenzen eines nicht optimal ablaufenden Prozesses sind neben unterschiedlichen Pyramidengrößen und –formen auch Fehlstellen. Die Eigenheiten von multikristallinen Siliziumwafern, genauer die Anzahl unterschiedlicher Kristallorientierungen und Kristallgrenzen in einem Wafer, verhindern an dieser Stelle den effizienten Einsatz des Standardtexturierungsprozesses durch eine

anisotrope Ätze. Die Ätzung einer multikristallinen Waferoberfläche mit dem Standardverfahren für monokristalline Wafer hat eine geringere Ätzrate und damit eine höhere Reflexionsrate zur Folge, was sich im Endeffekt zusätzlich negativ auf den Wirkungsgrad multikristalliner Solarzellen auswirkt; dennoch stellt der anisotrope Texturierungsprozess für beide Kristallqualitäten derzeit den industriellen Standard dar. Für multikristalline Siliziumwafer gibt es zwar wesentlich effektivere Verfahren, diese sind jedoch meist kostenintensiver in der Anwendung, schlecht in gängige Automatisierungslinien integrierbar oder besitzen schlicht einen zu geringen Durchsatz. Die vielversprechendsten Ansätze sind mechanisch hergestellte V-Gräben (können mit dünnen Sägedrähten eingefräst oder mit Lasern hergestellt werden), reaktives Ionenätzen (plasmaunterstütztes Ätzen) und eine chemische Texturierung mit einer isotropen sauren Ätzlösung aus Flusssäure (HF), Salpetersäure (HNO_3) und Wasser. Letzteres Verfahren führt zu einer porösen Waferoberfläche mit einer ähnlichen Funktion der Poren wie invertierte Pyramiden. [Rentsch 2005], [Nagel 2002]

Grundvoraussetzung für die Erzeugung eines pn-Übergangs in einem kristallinen Siliziumwafer ist eine kontaminationsfreie Oberfläche. Deshalb werden diese nach der Texturierung einem weiteren Reinigungsschritt unterzogen. Der Reinigungsschritt soll neben sonstigen organischen und anorganischen Resten speziell metallische Kontaminationen von der Oberfläche (oder durch Diffusionsvorgänge bereits oberflächennah) entfernen. Als industrieller Standard wird ein nasschemischer Reinigungsprozess, die sogenannte RCA-Reinigung[84], eingesetzt. Dieses Reinigungsverfahren besteht aus zwei Prozessen: SC-1 (Standard Clean 1) und SC-2 (Standard Clean 2). Im ersten Reinigungsschritt sollen verbliebene Partikel und organische Verunreinigungen mittels einer Lösung aus Ammoniumhydroxid, Wasserstoffperoxid und demineralisiertem Wasser entfernt werden. Beim zweiten Teil dieser nasschemischen Reinigung werden die metallischen Kontaminationen durch eine Mixtur aus Salzsäure, Wasserstoffperoxid und demineralisiertem Wasser entfernt. Mittlerweile wird jedoch zunehmend auf den SC-1 Prozess verzichtet. Gleichwohl sind derzeit auch andere nasschemische Reinigungsverfahren Gegenstand der Forschung.

[84] Wurde in den 1960ern ursprünglich für die Waferreinigung in der Mikroelektronik von der Radio Corporation of America (RCA) entwickelt, worauf die Namensgebung zurückzuführen ist.

Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen ist nun das bereits in der Abbildung 4-42 auf Seite 252 gesondert gekennzeichnete Zwischenprodukt: ein p-dotierter, texturierter, kristalliner Siliziumwafer. Im Anschluss an dessen Reinigung ist der Wafer bereit für die Erzeugung eines pn-Übergangs und damit für die Transformation in eine Solarzelle. Der Emitter einer industriell gefertigten kristallinen Standardsiliziumsolarzelle mit einer p-dotierten Basis wird über eine thermische Diffusion von Phosphoratomen in die Oberfläche des Wafers generiert. Prinzipiell werden zwei verschiedene Prozesse zur Implementierung einer Emitterschicht industriell genutzt: die Phosphordiffusion mittels flüssigen Phosphoroxychlorid ($POCl_3$) in einem horizontalen Rohrofen als Batchprozess und die Phosphordiffusion aus einer siebgedruckten oder aufgesprühten phosphorhaltigen Paste in einem offenen Banddurchlaufofen als kontinuierlicher Prozess.

Im ersten Fall werden die Wafer auf hitzebeständigen Glasbooten (Transportmittel) in einem horizontalen Rohrofen platziert. Durch einen Gaseinlass gelangen Phosphoroxychlorid und Sauerstoff in den Innenraum des Ofens, welcher aus einem Quarzrohr besteht. Die beiden Gase reagieren im Ofeninnenraum und setzten sich als Phosphorsilikatglas (PSG) auf der Waferoberfläche rundumher ab. Bei circa 900 °C, durch Erreichen der thermischen Aktivierungsenergie, beginnen Phosphoratome aus dem gebildeten PSG in die Waferoberfläche einzudiffundieren. Die Prozesstemperatur wird über elektrisch betriebene Heizelemente (Widerstandsheizung) bereitgestellt, weshalb dieser Prozess vergleichsweise viel Energie benötigt. Abbildung 4-43 zeigt zum besseren Verständnis eine Prinzipskizze des Verfahrens.

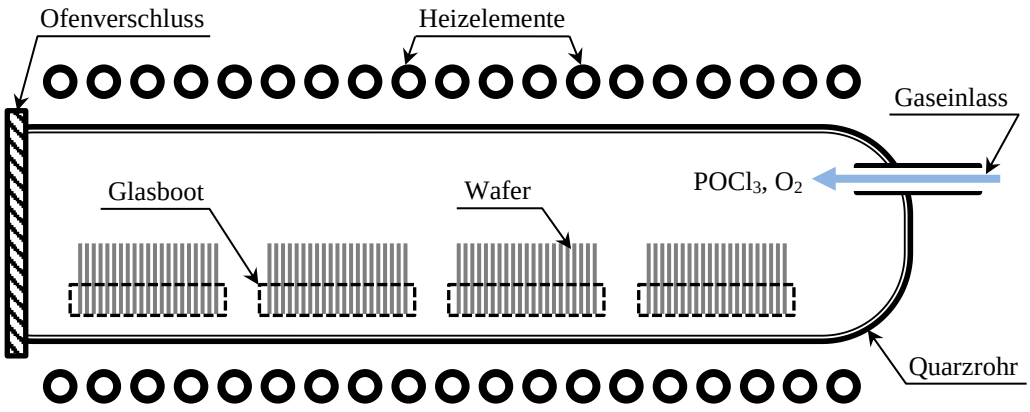


Abbildung 4-43: Prinzipskizze des Batchprozesses zur Emittererzeugung in einem p-dotierten kristallinen Siliziumwafer durch den Einsatz von $POCl_3$ im Innenraum eines horizontalen Quarzrohrofens.

Zum Abschluss des Batchprozesses werden die Halbleiterscheiben wieder aus dem Ofen entfernt. Die ursprünglich nur p-dotierten Wafer besitzen nun rundumher eine dünne n^+-dotierte Emitterschicht mit einer Eindringtiefe von rund 250 nm und eine mit PSG ummantelte Oberfläche. Das Phosphorsilikatglas muss anschließend in einem zusätzlichen Schritt von der Oberfläche wieder entfernt werden.

Bei der Verwendung des kontinuierlichen Prozesses in einem offenen Banddurchlaufofen werden die Wafer eingangs auf der Vorderseite mit einer phosphorhaltigen Paste bedruckt oder besprüht. Nach einer kurzen Trocknungsphase werden die vorbehandelten Wafer durch den Ofen transportiert und durchlaufen dabei verschiedene Temperaturprofile. In einem ersten Schritt werden die Wafer unter Zugabe von gereinigter Luft auf 600 °C erhitzt, um die organischen Bestandteile der Paste auszubrennen. Danach erfolgt ähnlich dem Batchprozess eine Erhitzung auf 950 °C um die Aktivierungsenergie für die thermische Phosphordiffusion zu liefern; jedoch unter Stickstoffzugabe. Wurde die phosphorhaltige Paste auf den Wafer siebgedruckt, kann, wie in folgender Abbildung dargestellt, ein Front-Surface-Field durch die unterschiedlich starke Diffusion direkt aus der Paste und indirekt aus der Gasphase erzeugt werden.

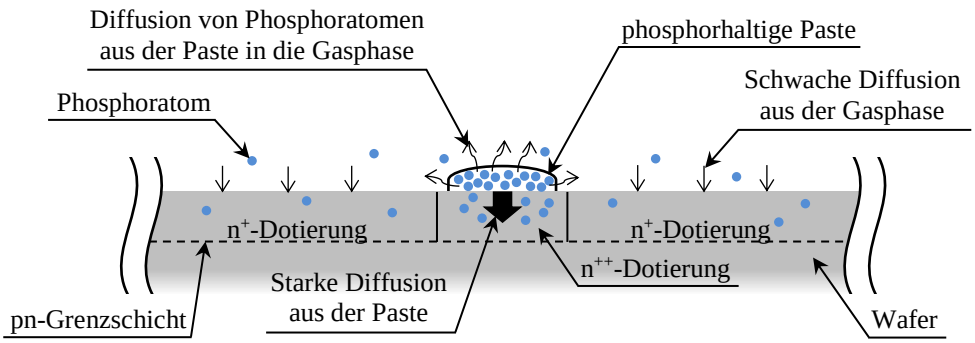


Abbildung 4-44: Schema der Erzeugung eines selektiven Emitters durch Siebdruck einer phosphorhaltigen Paste und unterschiedlicher Diffusionsraten aus der Paste und der Gasphase.

Neben der frontseitigen n^+-Dotierung durch die Diffusion aus der Gasphase führt dieser Vorgang jedoch zusätzlich zu einem „parasitären Befall“ der Waferkanten. Die erzeugte Emitterschicht zieht sich somit nicht nur über die gesamte Frontseite, sondern auch über alle seitlichen Waferbegrenzungen.

Die Vorteile dieses kontinuierlichen Prozesses, wie primär die Möglichkeit der Erzeugung eines Front-Surface-Fields als auch die simple Integration in einen linearen Produktionsprozess sowie die Möglichkeit der Implementation von Temperaturprofilen, wiegen jedoch nicht dessen Nachteile und die Vorteile des beschriebenen Batchprozesses

auf. Nachteile des kontinuierlichen Prozesses sind die Kontamination der Zelle durch einströmende Umgebungsluft und die Verunreinigung im Zuge der Diffusion von Fremdatomen aus dem Transportband des Ofens bedingt durch die hohen Prozesstemperaturen. Im Gegensatz dazu läuft der Batchprozess im Rohrofen unter einer kontrollierten Atmosphäre in einem quasigeschlossenen Raum ab, sodass eine Kontamination der Zelle ausgeschlossen werden kann. Weiterer Vorteil des Batchprozesses ist der wesentlich höhere Durchsatz im Vergleich zum Durchlaufofen, da viele Wafer in einem Quarzrohr simultan behandelt werden können und kommerzielle Rohröfen mindestens vier solcher Quarzrohre besitzen.[Tobías *et al.* 2003, S. 274] Hauptsächlich durch die Kontamination während des kontinuierlichen Prozesses und dessen geringen Durchsatzes findet in der industriellen Fertigung trotz der positiven Auswirkungen eines Front-Surface-Field (vgl. Kap. 3.3: „Evolution der kristallinen Siliziumsolarzelle“) auf die Zelleneffizienz der Batchprozess bevorzugt Einsatz, auch aufgrund seiner einfachen Handhabe und Steuerbarkeit. Deshalb wird den nachfolgenden Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit nur der beschriebene Batchprozess zugrunde gelegt.

Weitere Verfahren zur Erzeugung eines selektiven Emitters in einem kristallinen Siliziumwafer sind beispielsweise der sogenannte Rückätzprozess, INSECT (Inline Selective Emitter Concept), die Laserdotierung (entwickelt von Fraunhofer ISE), die Verwendung von hochdotierten Siliziumnanopartikeln im Siebdruckverfahren und die Ionenimplementation. Diese Prozesse sind jedoch meist noch Gegenstand der Forschung und nur in Pilotanlagen oder zur Produktion von Hocheffizienzzellen in Verwendung. Für die Nutzung in der kommerziellen Produktion von kristallinen Standardsiliziumzellen sind sie meist noch nicht ökonomisch integrierbar. Nähere technische Beschreibungen und Auswertungen erzielbarer Zellenwirkungsgrade auf Grundlage dieser Verfahren finden sich in [Rahman 2012], [Komatsu *et al.* 2009] und [Hahn 2010].

Nach der Emitterdiffusion im horizontalen Rohrofen ist die Zellenoberfläche von Phosphorsilikatglas ummantelt. Diese amorphe Schicht ändert ihre Beschaffenheit beim Aussetzen in ein feuchtes Milieu und würde eine qualitativ hochwertige Verbindung der Zellenkontakte mit dem Basismaterial erschweren. Zur Entfernung des Phosphorsilikatglases werden die einzelnen Zellen nach der Auskühlung vom Diffusionsprozess in einem zusätzlichen Produktionsschritt in ein Flusssäurebad (HF) eingetaucht. Infolge der allseitigen n^+-Dotierung während des Batchprozesses im Rohrofen würde der pn-Übergang einer auf diesem Wege gefertigten Solarzelle faktisch kurzgeschlossen. Dieserhalb

schließt sich eine Isolierung des pn-Übergangs durch eine Kantenätzung an, die den erzeugten Emitter in allen seitlichen Begrenzungen der Zelle wieder entfernt. In der industriellen Fertigung wird hierfür primär eine Plasmaätze mittels fluorhaltiger Verbindungen als Ätzgas eingesetzt. Die kristallinen Siliziumsolarzellen werden direkt übereinander gestapelt im Reaktor platziert. In einem Hochfrequenzfeld und unter Zugabe des Ätzgases, meist ein perfluorierter Kohlenwasserstoff wie beispielsweise Tetrafluormethan (CF_4) oder eine anorganische Fluorverbindung wie Schwefelhexafluorid (SF_6), bilden sich hochreaktive Radikale und Molekülfragmente, sowie energiereiche Ionen. Diese gehen je nach ihrer Spezies chemische oder physikalische Wechselwirkungen mit der offenen Zellenoberfläche ein und tragen diese bis zu einem bestimmten Niveau ab. Der Ätzvorgang erfolgt dabei nur an den freiliegenden seitlichen Zellenbegrenzungen, da die Vorder- und Rückseiten der Zellen durch die Flächen der benachbarten Zellen ob der direkten Stapelung geschützt sind. Vorteil dieses Trockenätzverfahrens gegenüber der Kantenisolierung mittels Schneideprozessen durch Laser oder Sägen ist der hohe erzielbare Durchsatz. Ähnlich der Emitterdotierung handelt es sich beim Plasmaätzen um einen Batchprozess, sodass viele Zellen simultan behandelt werden können.

Zur weiteren Reduktion der Reflexionsrate der später lichtzugewandten Zellenseite wird additional eine Antireflexionsschicht auf die bereits texturierte Oberfläche aufgebracht. Gleichwohl muss die Zellenoberfläche passiviert werden, um Verlusten durch den Effekt der Oberflächenrekombination vorzubeugen. Wurden hierfür zeitweise zwei Schichten unterschiedlicher Materialien genutzt, setzte sich seit den späten 1990ern standardmäßig die Verwendung einer einzelnen Lage aus Siliziumnitrid als Antireflexionsschicht bei gleichzeitiger Oberflächenpassivierung durch. Wie bereits im Kapitel 3.3: „Evolution der kristallinen Siliziumsolarzelle“ dargelegt, werden dafür hydrierte Siliziumnitride mittels PECVD (plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung) auf die Oberfläche der Zellenfront aufgebracht. Neben der exzellent wirkenden Oberflächenpassivierung durch eine Siliziumnitridbeschichtung, deren optimalen Brechungsindex für Licht einer Wellenlänge von 600 nm und hervorragenden mechanischen Eigenschaften, besteht ein weiterer Vorteil in der uneingeschränkten Anwendbarkeit sowohl für monokristalline als auch für multikristalline Siliziumoberflächen.

Die hauchdünnen und zerbrechlichen Zellen werden auf einem sogenannten Boot in den PECVD-Reaktor geführt. Im Inneren des Reaktors werden Monosilan (SiH_4) und Ammoniak (NH_3) durch ein elektrisches Feld angeregt und reagieren zu Siliziumnitrid (Si_3N_4) und Wasserstoff (H_2) nach folgender Reaktionsgleichung:

$$3SiH_4 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 12H_2$$ **Formel 4-8**

Das auf diese Weise gebildete Siliziumnitrid scheidet sich dann plasmagestützt auf der Zellenoberfläche flächig ab. Zusätzlich zu den bereits genannten Vorteilen bewirkt die Abscheidung einer Siliziumnitridschicht mittels PECVD durch die reaktionsbedingte Generierung von Wasserstoffatomen speziell bei der Produktion multikristalliner Siliziumsolarzellen zudem eine effektive Passivierung möglicher Rekombinationszentren in der Zellenbasis.

Durch die Beschichtung der Zellen mit Siliziumnitrid erscheint die Frontseite in der für kristalline Siliziumsolarzellen charakteristischen Blaufärbung. Somit können nun Zellenfront und -rückseite auch optisch voneinander unterschieden werden.

Um die durch den photovoltaischen Effekt generierten Ladungsträger im Sinne einer gebrauchsfähigen Solarzelle nutzen zu können, müssen letztlich noch die elektrischen Front- und Rückkontakte erzeugt werden. Seit Beginn der kommerziellen Herstellung kristalliner Standardsiliziumzellen werden diese fast ausschließlich mit Hilfe des Siebdruckverfahrens auf die Solarzellen aufgebracht. Die Bedruckung der Solarzelle mit Front- und Rückkontakten erfolgt dabei in getrennten Schritten, jeweils ergänzt durch eine kurze thermische Behandlung bei rund 200 °C zur Trocknung der Druckpaste.

Im ersten Schritt werden Lötkontaktflächen auf die Zellenrückseite aufgedruckt, um an diesen definierten Stellen bei der späteren Modulfertigung die Anschlussdrähte, beziehungsweise die Stringverbindungen anlöten zu können. Die Druckpaste besteht typischerweise aus 65 – 70 Gew.-% Silberpuder in Form von Kristalliten mit einem Durchmesser von mehreren Mikrometern. Weitere Bestandteile sind verschiedene Oxide aus Blei und Bismut ($\Sigma \approx 8$ Gew.-%) zur Förderung der Reaktivität beim späteren Kontaktfeuern sowie 22 – 27 Gew.-% organische Löse- und Bindemittel um der Druckpaste einerseits eine für den Druckprozess nötige Viskosität zu verleihen und um andererseits die Oxide und das Silberpuder bis zum Kontaktfeuern stabil zusammenzuhalten. Die Lötkontaktflächen sind herstellerspezifisch zwischen zwei und drei

Millimeter breit. Beim Siebdruckverfahren wird die Paste mittels einer Rakel durch definierte Schlitze einer vorgegebenen Maske auf die Zellenoberfläche gerieben. Zum besseren Verständnis ist das Verfahren in Abbildung 4-45 in einzelnen Schritten dargestellt.

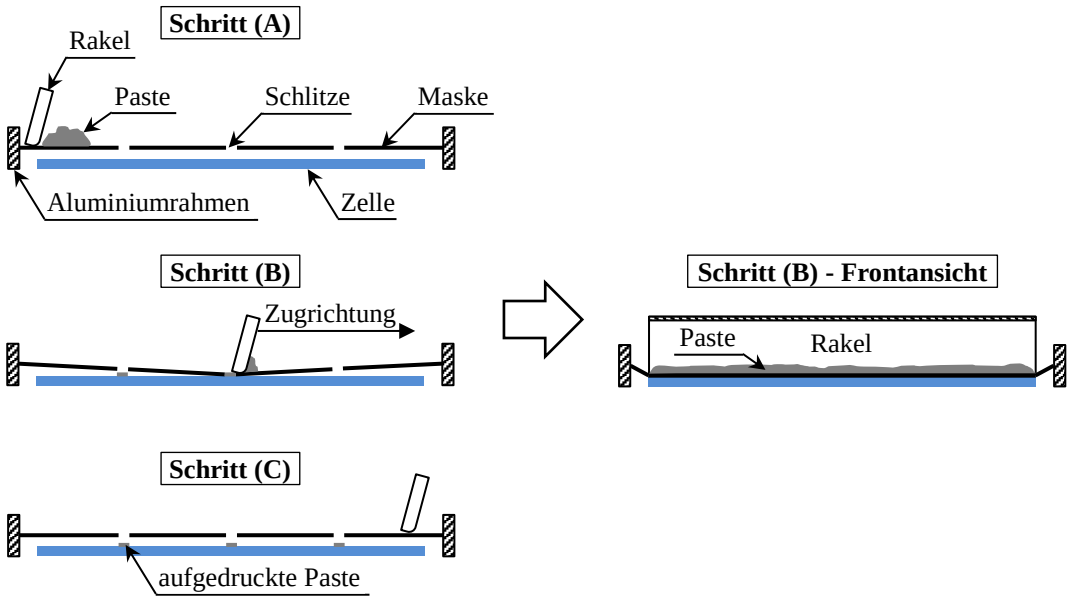


Abbildung 4-45: Schritte des Siebdruckverfahrens zur Erzeugung der Front- und Rückkontakte einer Standardsiliziumsolarzelle.

Zu Beginn wird die unbedruckte Zelle passgenau unter die Maske geführt. Maske und Zelle stehen dabei nicht in Kontakt. Die Druckpaste und die Rakel werden, wie im Schritt (A) abgebildet, außerhalb des vorgegebenen Musters auf der Maske aufgebracht. Die Rakel wird anschließend mit Druck über die Maske geführt, wodurch Maske und Zelle in Kontakt kommen. Schritt (B) zeigt, wie die Rakel die Paste ganzflächig über die Maskenöffnungen in Zugrichtung vor sich her schiebt. Nach Überschreiten aller Schlitze bleibt die Paste an der Zelle zwischen den definierten Maskenöffnungen haften. Die Menge der so aufgedruckten Paste ist abhängig von der Dicke der Maske und der Dimension der vorgegebenen Schlitze. Die Rakel überquert die gesamte Maske und füllt dabei jeden Schlitz mit der Druckpaste. Am Ende des Prozesses, wie in Schritt (C) angedeutet, befindet sich die Rakel am anderen Maskenende. Maske und Zelle stehen nun nicht mehr in Kontakt und die Zelle wird entfernt.

Direkt im Anschluss werden die organischen Lösungsmittel der Paste verdampft. Dazu wird die bedruckte Zelle auf rund 200 °C erhitzt. Während dieses Trocknungsschrittes härtet die Druckpaste aus und kann so bei nachfolgenden Prozessschritten nicht verwischen oder Ähnliches; die mechanische Stabilität der Paste erhöht sich.

Nachdem die Lötkontaktflächen auf die Zelle „gerieben“ wurden, schließt sich der Druck des ganzflächigen Rückkontaktes an. Dieser Prozess gleicht dem Druck der Lötkontaktflächen, jedoch mit zwei substanziellen Unterschieden. Zum einen wird eine exakt inverse Maske genutzt, wodurch die Rückseite der Zelle nach diesem Prozessschritt vollkommen bedruckt vorliegt. Zum anderen besitzt die eingesetzte Druckpaste eine völlig andere Zusammensetzung. Hauptbestandteil dieser Paste ist Aluminium (~ 80 Gew.-%). Weitere Bestandteile sind gereinigter Quarzsand mit rund 3 Gew.-% sowie circa 17 Gew.-% organische Löse- und Bindemittel. Die organischen Bestandteile besitzen dieselben druckrelevanten Aufgaben wie die der Paste für die Lötkontaktflächen. Bedingt durch die vollflächige Ausführung des Rückkontaktes besitzt dieser selbst bei einer sehr dünnen Realisierung einen niedrigen ohmschen Widerstand. Darüber hinaus stellt er sich für einen hohen Wirkungsgrad der Zelle bei materialsparender Gestaltung der Zellenbasis und des Emitters als immens wichtig heraus. Wie bereits im Kapitel 3.3: „Evolution der kristallinen Siliziumsolarzelle“ beschrieben, wirkt ein vollflächiger Rückkontakt aus Aluminium als optischer Reflektor am Zellenboden und mindert so Transmissionsverluste bei einem dünnen Zellendesign. Durch die hervorgerufene optische Reflexion am Zellenboden zeitigt ein vollflächiger Zellenrückkontakt aus Aluminium in Verbindung mit der Vorderseitentexturierung der Zelle zudem den Effekt des Light Trapping[85].

Direkt nach dem Druck des (restlichen) Rückkontaktes schließt sich wiederum ein Trocknungsprozess, analog dem der Lötkontaktflächentrocknung, zur Verdampfung der organischen Lösemittel und der mechanischen Stabilisierung der gedruckten Kontakte an. In Abbildung 4-46 ist die Rückseitenkontaktierung einer monokristallinen Siliziumsolarzelle beispielhaft[86] dargestellt. Die Ansicht versteht sich nach beiden Druckprozessen inklusiver der jeweiligen Trocknungsschritte.

[85] Für nähere Informationen zum Effekt wird auf Kapitel 3.3: „Evolution der kristallinen Siliziumsolarzelle“ verwiesen. Dort finden sich neben bauartbedingten Vorteilen für das Zellendesign und physikalischen Vorgängen in der Zelle durch Nutzung des Light Trapping auch die Auswirkungen auf die Evolution des Designs und des Wirkungsgrades kristalliner Siliziumsolarzellen.

[86] Anzahl und Breite der Lötkontaktflächen können herstellerspezifisch abweichen.

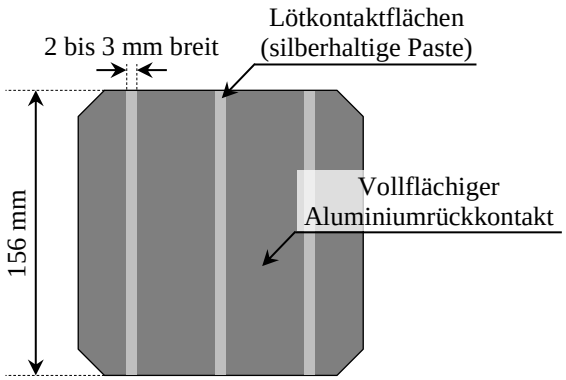


Abbildung 4-46: Beispielhafte Rückansicht einer monokristallinen Siliziumsolarzelle nach dem Siebdruck der Rückkontakte.

Der Siebdruck der Frontkontakte stellt einen zentralen Schritt während der Produktion kristalliner Standardsiliziumsolarzellen dar. Wichtige Kriterien für die Auslegung der Sammelschienen und der Kontaktfinger sind neben der optimalen Menge der zu verwendenden Paste je Zelle, was auf Überlegungen zur Kostenreduktion basiert; möglichst gute Kontakteigenschaften der Paste mit der Zelle; ein geringer Oberflächenrekombinationseffekt am Halbleiterkristall-Metallfrontkontakt-Übergang; sowie das bereits erwähnte Optimierungsproblem zwischen einem möglichst niedrigen ohmschen Widerstand in den Frontkontakten und einer minimal abgeschatteten Fläche durch die Frontkontakte. Eine Restriktion des beschriebenen Optimierungsproblems der Frontkontaktgestaltung ist der Entwicklungsstand der Drucktechnik. Ein entscheidender Fortschritt hin zu dünneren Kontaktfingern gelang mit der Einführung der Fotolithografie zur Herstellung präziser Druckmasken. Gleichwohl stand und steht die Optimierung der Druckpaste im Fokus der Forschung, um bei schmaleren Kontaktfingern weiterhin einen niedrigen ohmschen Widerstand zu gewährleisten.

Die Masken für den Siebdruck der Frontkontakte bestehen aus einem Netz dünner Drähte, aufgespannt in einem Aluminiumrahmen. Drahtmaterial ist typischerweise synthetisches Gewebe oder Edelstahl. Das Drahtnetz ist mit einer lichtempfindlichen Schicht bedeckt, welche fotolithographisch an definierten Stellen entfernt wird. Diese „Fehlstellen“ sind ausschlaggebend für den Druck der Frontkontakte. Die Druckpaste besitzt eine ähnliche Zusammensetzung wie jene für den Druck der Lötkontaktflächen. Mit 80 bis 85 Gew.-% sind Silberkristallite ebenfalls Hauptbestandteil. Blei- und Bismutoxide sind in Summe mit rund 5 Gew.-% enthalten. Den restlichen Anteil von 10 bis 15 Gew.-% stellen organische Bestandteile zur Justierung der Pastenviskosität und -stabilität. Der Druck der Frontkontakte gleicht in seinem Prozedere dem der Rückkontakte – inklusive des

Trocknungsschrittes. Die Architektur, bestehend aus Sammelschienen und Kontaktfingern, stellt sich jedoch wesentlich diffiziler als die der Rückkontakte dar. Abbildung 4-47 zeigt eine beispielhafte Frontkontaktarchitektur einer monokristallinen Standardsiliziumzelle, wie sie mittels der Siebdrucktechnologie erzeugt wird.

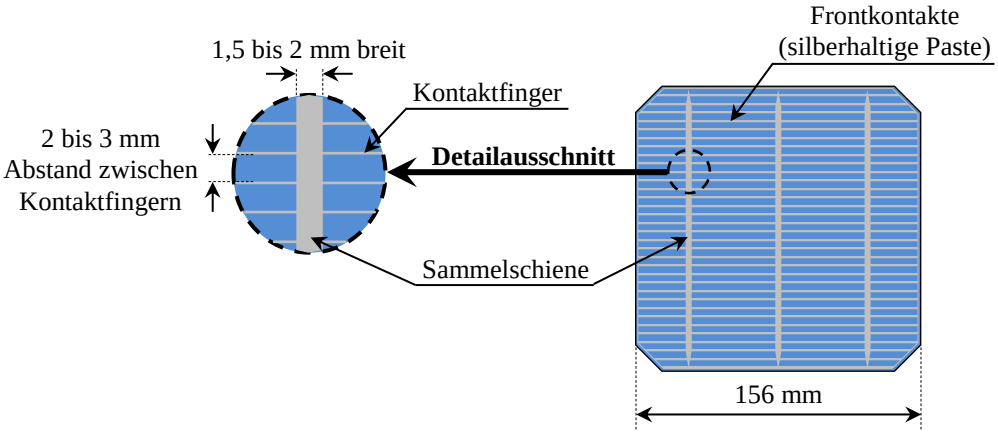


Abbildung 4-47: Beispielhafte Frontkontaktarchitektur nach dem Siebdruckverfahren mit Detailausschnitt der Sammelschienen und der Kontaktfinger.

Die Abstände zwischen den Kontaktfingern betragen 2 bis 3 mm. Anzahl und Breite der Sammelschienen je Zelle variieren herstellerspezifisch zwischen 2 und 3 Stück mit Breiten von 1,3 bis 2 mm. Je nach Ausführung, Qualität der Paste und Druckgenauigkeit kann die Frontkontaktarchitektur bis zu 10 % der lichtzugewandten Zellenseite verschatten. Die auf diese Weise abgeschattete Zellenoberfläche senkt den Wirkungsgrad der Zelle und führte deshalb neben der Verringerung der bedruckten Frontfläche durch dünnere Kontaktfinger auch zu neuen Ansätzen im Zellendesign wie der Buried-Contact-Zelle und der Rückkontaktzelle. Mit der Senkung der Breite der mittels des Siebdruckverfahrens hergestellten Kontaktfinger bei Standardsiliziumsolarzellen von durchschnittlich 150 µm im Jahre 2000 auf rund 65 µm im Jahr 2013 (entspricht einer Reduktion der Fingerbreite um rund 57 %) konnte, abgesehen von der Verringerung der Verschattungsverluste auf rund 6 %, die Menge der verwendeten Druckpaste je Zelle erheblich reduziert werden [Forstner *et al.* 2014]. Mit der Senkung der benötigten Druckpaste zur Erzeugung der Frontkontaktarchitektur je Zelle reduziert sich, unter der Annahme einer gleichbleibenden Pastenzusammensetzung, die Menge des benötigten Silbers je Zelle im gleichen Verhältnis. Da Silber eines der teuersten Materialen in der heutigen Zellenproduktion darstellt [Forstner *et al.* 2014], basiert die Senkung der eingesetzten Druckpaste gleichwohl auf Kostenüberlegungen. Weitere Ausführungen hierzu finden sich im nachfolgenden Kapitel zu den stofflichen und energetischen Betrachtungen der Produktion kristalliner Siliziumzellen.

Wie bereits erwähnt, sind aufgrund der dargelegten Kriterien und Auswirkungen der Drucktechnik und der Architektur der Frontkontakte weitere Verfahren in der Erprobung beziehungsweise Gegenstand der Forschung. Wenngleich andere Technologien wie das Buried-Contact-Konzept, die Feinlinienmetallisierung oder der Coextrusionsdruck verschieden Vorteile wie eine bessere Druckgenauigkeit, dünnere Kontaktfinger oder geringere Verschattungsverluste bieten, reichen sie derweilen nicht an die Kostenvorteile infolge des hohen erzielbaren Durchsatzes der Siebdrucktechnologie heran. Moderne Siebdruckanlagen brauchen für den Druck der Frontkontaktierung zwischen 1 und 2 Sekunden, inklusiver des Nachladevorgangs (Einführen, Ausrichten und Entfernen des Wafers aus der Apparatur).

Gleichwohl sind aber auch Weiterentwicklungen des Siebdruckverfahrens zur Herstellung der Frontkontaktarchitektur in der Erprobung. Dabei werden zwei verschiedene Erweiterungen des Standarddrucks forciert. Dies ist zum einen der Doppeldruck der Frontkontakte um bei erhöhter Druckgenauigkeit das Breiten-Höhen-Verhältnis der Kontakte zu optimieren und gleichzeitig die Zusammensetzung der Druckpaste je Druckschicht optimal an die jeweiligen Anforderungen anzupassen. Zum anderen handelt es sich um den getrennten Druck der Sammelschienen und der Kontaktfinger, wiederum um den Silbergehalt der Druckpaste für die Sammelschienen zu reduzieren. Beide Verfahren sollen jedoch frühestens im Jahr 2020 einen nennenswerten Marktanteil besitzen. [Forstner *et al.* 2014]

Nach dem Siebdruck der Front- und Rückkontakte muss die Zelle einem abschließenden Produktionsschritt unterzogen werden: der Kontaktfeuerung. Dies ist für die Funktionsfähigkeit einer, auf Basis der in Abbildung 4-42 (Seite 252) dargestellten Produktionssequenz, gefertigten kristallinen Standardsiliziumsolarzelle aus mehreren Gründen notwendig.

Erstens müssen die organischen Bindemittel aus den Druckpasten vom Frontkontakt, vom vollflächigen Rückkontakt und von den Lötkontaktflächen auf der Zellenrückseite noch ausgebrannt werden. Zweitens sind die Frontkontakte auf die Antireflexionsschicht aufgedruckt, wodurch kein direkter Konnex zwischen Emitter und gedruckter Kontaktierung besteht. Folglich ist auch keine, oder nur mit einem sehr hohen ohmschen Widerstand verbundene, elektrische Leitung möglich. Drittens liegt der vollflächige Rückkontakt über einer parasitären n^+-dotierten Schicht, welche zur Bildung eines BSF vollkommen durchdrungen und überkompensiert werden muss.

Die Kontaktfeuerung ist ein Dreiphasenprozess und erfolgt in einem Gürtelofen. Eingangs werden die bedruckten Zellen allgemach auf maximal 810 °C erhitzt, wobei die organischen Bindemittel der Druckpaste ausgebrannt werden. Im zweiten Schritt wird die Maximaltemperatur für rund 5 Minuten beibehalten. Währenddessen ereignen sich folgende Abläufe parallel. Einerseits „durchbrennen“ die gedruckten Frontkontakte die Antireflexionsschicht, was einen direkten Konnex der Frontkontakte mit dem Emitter bewirkt. Andererseits bildet sich auf der Zellenrückseite eine flüssige Phase aus Aluminium und Silizium am eutektischen Punkt des Gemisches. Während der Abkühlung rekristalliert das Silizium p^+-dotiert und substituiert den parasitären Rückseitenemitter der Zelle. Resultat ist letztlich die Bildung eines BSF im Zellenboden.

Im Falle des Frontkontaktes ermöglichen die Blei- und Bismutoxide das Sintern der Silberkristallite. Als Folge dessen schmelzen die einzelnen, jeweils benachbarten Kristallite zusammen und bilden einen kontinuierlichen Leiter mit geringem Flächenwiderstand. Zugleich durchätzen die Oxide die darunter befindliche Siliziumnitridschicht und anschließend Teile des Emitters (bis zu 100 nm Eindringtiefe in die Emitterschicht). Dieser Vorgang ist neben der Prozesstemperatur auch von der Verweildauer und der Zusammensetzung der Druckpaste abhängig. Die Parameter müssen so gewählt werden, dass zwar die Antireflexionsschicht unter den gedruckten Frontkontakten entfernt werden kann, dabei aber nicht der darunter befindliche Emitter kurzgeschlossen wird. Nach der Abkühlung verfügen die Zellen über einen direkten Konnex der Frontkontakte mit dem Emitter, wodurch der Abtransport photogenerierter Ladungsträger aus der Zelle über die Frontkontakte bei geringem ohmschen Widerstand ermöglicht wird.

Auf der Zellenrückseite wird während der hohen Prozesstemperaturen die zwischenzeitlich erzeugte Emitterschicht durch die Verwendung der bereits aufgeführten speziellen Druckpaste überkompensiert. Ergebnis ist die Generierung eines BSF, welches den Effekt der Oberflächenrekombination auf der Zellenrückseite deutlich reduziert (vergleich Kapitel 3.3: „Evolution der kristallinen Siliziumsolarzelle“). Die Überkompensation der vorab erzeugten parasitären n^+-Dotierung resultiert aus einer einstweiligen Bildung einer eutektischen Legierung aus Aluminium und Silizium. Während der konstanten Hochtemperaturstufe der Kontaktfeuerung bildet sich sodann eine flüssige Aluminium-Silizium-Phase[87] aus, welche dem Zweiphasendiagramm beider Elemente

[87] Die aus Aluminium und Silizium bestehende Schmelze auf der Zellenrückseite stellt eine sehr gute Grundlage zur Defektgetterung dar.

folgt. Wenngleich reines Silizium zwar eine Schmelztemperatur von 1.410 °C (unter Normalbedingungen) besitzt, formen beide Elemente eine flüssige Phase am eutektischen Punkt bei bereits 577 °C. Während der Abkühlung der Zelle rekristalliert das Silizium ob der eutektischen Zusammensetzung mit der für die gegebene Temperatur maximalen Aluminiumkonzentration – als p^+-dotierte[88] Schicht. Neben den Prozessparametern Temperatur, Verweildauer und der Zusammensetzung der Druckpaste spielt hier die Dicke der initial aufgedruckten Kontaktschicht eine entscheidende Rolle. So ist einerseits eine gewisse Dicke der gedruckten aluminiumhaltigen Rückschicht für einen ausreichenden beziehungsweise vollständigen Einbezug der parasitären n^+-dotierten Siliziumschicht bei der Bildung des flüssigen Zweistoffsystems nötig. Andererseits kann, besonders bei Verwendung eines vollflächigen Druckes auf sehr dünnen Wafern, eine zu dick gewählte Druckschicht ob unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten der beteiligten Stoffe Krümmungen der Zellen und sonach einen erhöhten Ausschuss durch Bruchschäden während der Kontaktfeuerung bewirken. [Szlufcik *et al.* 2012]

Die Substitution der n^+-dotierten Schicht durch die stark p-dotierte Schicht führt zu einem p^+p-Übergang auf der Zellenrückseite. Analog den Vorgängen beim pn-Übergang bildet sich infolge der Diffusion von Elektronen aus der p- in die p^+-dotierte Lage eine Raumladungszone (RLZ) über die Grenzschicht hinweg aus[89]: das sogenannte Back-Surface-Field (BSF).

Letzter Schritt der betrachteten Produktionssequenz ist die Prüfung der gefertigten Solarzellen und deren Klassifikation. Die Prüfung der kristallinen Siliziumsolarzellen zielt dabei nicht nur auf die Detektion von Defekten und Schäden ab, sie umfasst ebenso die Vermessung der Leistungsfähigkeit jeder produzierten Solarzelle unter Standardtestbedingungen. Ähnlich einer verschatteten Solarzelle schmälert eine, im Vergleich zu allen anderen Zellen eines Moduls, „leistungsschwache“ Zelle den gesamten Output eines Moduls. Die Sortierung nach Leistungsklassen ermöglicht so ein optimales Zusammenspiel aller Zellen im Modulverbund und minimiert etwaige Leistungseinbußen infolge von Mismatching.

[88] Der zugehörige Bereich der Fremdatomkonzentrationen für kristallines Silizium ist Tabelle 3-5, Kapitel 3.2: „Überblick der verschiedenen Technologien“, Seite 86 zu entnehmen.

[89] Vgl. Kapitel 2.1.4: „pn-Übergang und Bildung der Raumladungszone“, S. 46ff i.V.m. Kapitel 3.3: „Evolution der kristallinen Siliziumsolarzelle“.

Kristalline Standardsiliziumsolarzellen, die nach der eingangs in Abbildung 4-42 auf Seite 252 dargestellten Produktionssequenz gefertigt wurden, besitzen sonach folgende Attribute:

- eine Grundfläche von 243,36 cm² mit Kantenabmessungen für Länge x Breite von 15,6 cm x 15,6 cm bei einer Dicke von circa 180 µm (ergibt sich aus der Dimensionierung des verwendeten Prozessinputs: kristalliner Siliziumrohwafer);
- einen unsymmetrisch dotierten pn^+-Übergang mit einem circa 250 nm tiefen Emitter in der Zellenoberseite;
- eine passivierte Oberfläche und isolierte Zellenkanten;
- einem p^+p-Übergang in der Zellenrückseite, was in einem BSF resultiert;
- einer texturierten Zellenfront, die zusätzlich mit einer Antireflexionsschicht aus Siliziumnitrid versehen ist;
- ein siebgedruckter vollflächiger Aluminiumrückkontakt inklusive Lötkontaktflächen;
- die Nutzung von Light Trapping infolge des optischen Reflektors am Zellenboden und der texturierten Zellenfront sowie
- siebgedruckte Frontkontakte bestehend aus Stromsammelschienen und Kontaktfingern einer Breite von circa 65 µm.

Solche Zellen besitzen in Abhängigkeit der jeweiligen Kristallqualität typische Leistungsmerkmale wie eine erzeugte Kleinspannung von circa 0,5 bis 0,6 V je Zelle bei rund 7,3 A Gleichstrom (unter STC). Der elektrische Leistungsbereich liegt somit gemittelt bei 3,65 W_p für multikristalline Zellen und 4,38 W_p für monokristalline Zellen. Der durchschnittliche Wirkungsgrad beträgt für multikristalline Zellen circa 17,5 % und für monokristalline Zellen rund 19,2 % [Forstner *et al.* 2014, ENF Ltd. 2014].

Für anschließende Betrachtungen wird aus nachstehenden Gründen eine durchschnittliche Standardleistung für beide Kristallqualitäten von 4 W_p angenommen:

1. In den folgenden Abschnitten der Fertigungssequenz hin zu einem Standardsolarmodul sind die Rahmenbedingungen für die Verwendung beider Kristallqualitäten identisch. Eine gemeinsame Betrachtung der weiteren Produktionsschritte, sich ergebender Zusammensetzungen sowie stofflicher und energetischer Bezüge dient einer leichter verständlichen Diskussion und vermeidet unnötige Dopplungen.

2. Beide Kristallqualitäten teilen sich im Umfang der bereits erfolgten Betrachtungen annähernd den Markt der kristallinen Siliziumsolartechnologie (vgl. Abbildung 4-17, Kapitel 4.4, Seite 203), weshalb auch nahezu gleiche Anteile beider Zellenarten bisher installiert wurden. Eine Einzelbetrachtung auf Basis der Leistungsmerkmale würde sonach einen similären Wert wie eine Erhebung mittels des durchschnittlichen Leistungsmerkmals von 4 W_p liefern, für die Betrachtungen und die Diskussionen jedoch unnötig obstruierend wirken.

4.5.4.2 Stoffliche und energetische Betrachtungen

Gegenwärtig kommerziell gefertigte monokristalline und multikristalline Standard-siliziumsolarzellen basieren gemeinsam auf der in Abbildung 4-42 auf Seite 252 dargestellten Produktionssequenz und unterscheiden sich nur in wenigen Herstellungs-schritten marginal, weshalb bei beiden Kristallqualitäten auch die gleichen Chemikalien zum Einsatz kommen. Durch die bereits begründete Annahme der gleichen Grundfläche der jeweiligen kristallinen Siliziumrohwafer als Prozessinput sind nunmehr auch die Mengen der verwendeten Prozessadditive gleichzusetzen. Sonach können die stofflichen und energetischen Ströme während der Produktion für beide Zellenarten gemeinsam betrachtet werden.

Tabelle 4-22 zeigt dieserhalb alle für den in Abbildung 4-42 auf Seite 252 angegebenen Produktionspfad benötigten Material- und Energieströme gleichbedeutend für mono-kristalline und multikristalline Standardsiliziumsoalrzellen. Die Daten basieren auf den Einzelprozessrohdaten nach [Jungbluth *et al.* 2012], welche sich vollständig im Anhang 4-9 wiederfinden. Abweichende Positionen sind gesondert gekennzeichnet.

Tabelle 4-22: Stoff- und Energieströme in der Produktion kristalliner Standardsiliziumsolarzellen.

	je m² Solarzelle$_{sc/mc}$	**Menge**	**Einheit**	**Bemerkung**
Input	**Wafer$_{sc/mc}$**	1,064	m²	Inklusive 6 % Ausschuss; 15,6 cm²
	Strom	30,24	kWh	
	Prozesswärme	5,4	MJ	Nach [ecoinvent o.J.], aktualisierte Daten
	Druckpastenbestandteile			
	- Silber	4,109	g	Neu berechnet, alter Wert: 9,444 g; Verlustfrei
	- Σ Blei und Bismut	0,364	g	Neu berechnet, alter Wert: 0,764 g; Verlustfrei
	- Aluminium	57,52	g	Bleibt gleich; Verlustfrei
	- Siliziumdioxid	2,157	g	Bleibt gleich; Verlustfrei
	- organische Löse- und Bindemittel	13,29	g	Neu berechnet, alter Wert: 14,37 g; Verlustfrei
	Natriumhydroxid	157	g	50 %-ige wässrige Lösung; für Oberflächenätzung und Reinigung
	Isopropanol	78,9	g	Zur Reinigung
	Salzsäure	45,6	g	30 %-ige wässrige Lösung; RCA-Reinigung – SC 2
	Wasser	137,25	kg	Demineralisiert nach [ecoinvent o.J.]
	Phosphoroxychlorid	1,59	g	Emitterdiffusion
	Sauerstoff, flüssig	101,9	g	Emitterdiffusion
	Flusssäure	37,7	g	Entfernung des PSG
	Tetrafluorethylen	3,16	g	Σ fluorierter Gasquellen wie CF_4, SF_6
	Monosilan	1,21	g	Siliziumnitridbeschichtung
	Ammoniak, flüssig	6,74	g	Siliziumnitridbeschichtung
	Stickstoff, flüssig	1,85	kg	
	Ethanol	0,64	g	99,7 %-ige Lösung, Reinigung
	Essigsäure	2,83	g	98 %-ige Lösung, Reinigung
	Argon, flüssig	25,7	g	Schutzgasatmosphäre

Wie bereits angegeben, unterscheiden sich die Pasten für den Frontkontaktdruck, den Lötkontaktflächendruck und den Druck des vollflächigen Rückkontaktes hinsichtlich ihrer Bestandteile. Tabelle 4-23 fasst diese nochmals übersichtlich zusammen, wobei sich die jeweiligen Inhaltsangaben inklusive 1 % Verlust verstehen. Daten nach [Jungbluth *et al.* 2012]

Tabelle 4-23: Bestandteile der Pasten für den Siebdruck der Kontakte monokristalliner und multikristalliner Standardsiliziumsolarzellen, sowie verwendete Menge der kontaktspezifischen Druckpaste. Daten nach [Jungbluth *et al.* 2012].

	je kg Druckpaste	Einheit	Druckpaste		
			Frontkontakt	**Rückkontakt**	**Lötkontaktfläche**
Bestandteil	**Silber**	g	838,0		677,0
	Σ Blei und Bismut	g	50,5		80,8
	Aluminium	g		808,0	
	Siliziumdioxid	g		30,3	
	Organische Löse- und Bindemittel	g	121,0	172,0	253,0
Verwendete Gesamtmenge je m² Zelle		g	7,4	71,9	4,93

Die Gesamtmenge der kontaktspezifischen silberhaltigen Druckpaste ergibt sich sonach durch Addition der verwendeten Mengen für den Druck der Frontkontakte und der Lötkontaktflächen auf der Zellenrückseite und beträgt nach [Jungbluth *et al.* 2012] 12,33 g. Durch die Multiplikation der anteiligen und verlustbefreiten Silbermenge ergibt sich die gesamt verwendete Silbermenge je m² Zelle zu 9,444 g, oder 229,85 mg Silber je Zelle bei einer Zellengrundfläche von 243,36 cm².

Laut [Forstner *et al.* 2014] und [Neuhaus 2014] kam es zwischen 2000 und 2013 ob fortschrittlicher Drucktechniken zu einer Verringerung der Fingerbreiten der Frontkontakte auf 65 µm (entspricht einer Reduktion um rund 57 %) bei zusätzlich gestiegener Druckpräzision um ± 20 µm. Gleichwohl sank die gesamt verwendete Silbermenge je Zelle auf 140 mg im Jahr 2013. Darüber hinaus gibt [Forstner *et al.* 2014] für 2014 Gesamtsilberwerte je Zelle von 100 mg bei Fingerbreiten von durchschnittlich 55 µm und einer wiederum gestiegenen Präzision um ± 15 µm an. Zum Vergleich ergibt sich daraus 4,109 g Silber je m² produzierter Standardsolarzelle. Unter der Annahme einer gleichbleibenden Zusammensetzung der Druckpasten kann diese Silberreduktion nicht alleinig auf die Minderung der Kontaktfingerbreite zurückgeführt werden, da dies gleichbedeutend mit einer Verringerung der Pastenmenge für den Frontkontaktdruck um 87 % auf rund 0,965 g je m² Zelle wäre. Dieserhalb ist auch von einer Minderung der verwendeten Druckpaste für die Lötkontaktflächen auszugehen. Da die Architektur der Frontkontakte einen erheblichen Einfluss auf die Zelleneffizienz, beispielsweise durch die damit verbundene verschattete Fläche, hat, ist die Verringerung der verwendeten Silbermenge je produzierter Zelle jedoch in einem stärkeren Maße auf die Fingerbreitenreduktion als auf die Lötkontaktflächen zurückzuführen. In der vorliegenden

Arbeit wird deshalb ein Verteilungsschlüssel der Reduktionen von 0,75 zu 0,25 zwischen Frontkontaktdruck und dem Druck der Lötkontaktflächen angenommen. Demnach ergibt sich die verwendete Menge an Druckpaste für die Frontkontakte bei einer durchschnittlichen Fingerbreite von 55 µm zu 2,577 g je produziertem Quadratmeter Zellenfläche. Die Menge der verwendeten Druckpaste für die Lötkontaktflächen beträgt dementsprechend 2,941 g bei gleichem Bezug.

Neben der Verbesserung der Drucktechnologie ist laut [Forstner *et al.* 2014] die Reduktion der Silbergehalte der relevanten Druckpasten ebenfalls ausschlaggebend für die Minderung der verwendeten Gesamtsilbermenge je Zelle auf 100 mg. Durch die schlechte Datenlage[90] und die geringfügige Änderung der Silberkonzentration in den Druckpasten findet dies in der vorliegenden Berechnung jedoch keine Beachtung.

Infolge der Neuberechnung der verwendeten Druckpastenmengen müssen auch die verwendeten Materialien aus den Druckpasten je produziertem Quadratmeter Solarzelle der Tabelle 4-22 neu berechnet werden. Hierfür werden die betrachteten Ingredienzien exklusive der Verluste mit der jeweils zugehörigen neuen Pastenmenge multipliziert und für gleiche Bestandteile aufsummiert. Die Aluminium- und Siliziumdioxidwerte ändern sich indes nicht, da keine Reduktion der verwendeten Druckpaste bekannt ist.

4.5.5 Fertigung Standardsolarmodul

Die getesteten und sortierten Standardsiliziumsolarzellen bilden die funktionale Grundeinheit eines Solarmoduls. Wie bereits im Kap. 4.5.1.2: „Allgemeine stoffliche Zusammensetzung Standardmodul“ andiskutiert, existieren bei Solarmodulen für Standardanwendungen eine Vielzahl an Designvariablen (vgl. Tabelle 4-10, S. 212). Diese wirken sich auf unterschiedlichste Art und Weise auf die stoffliche Zusammensetzung sowie die notwendigen Produktionsschritte und -additive aus. Zur Schaffung einer adäquaten Betrachtungsgrundlage werden deshalb an dieser Stelle die Designvariablen eingegrenzt und ein Standardsolarmodul definiert. Dies erfolgt unter Zuhilfenahme der derzeitigen Marktanteile der verschiedenen Konzepte.

[90] Aktuelle Zusammensetzungen unterliegen dem Betriebsgeheimnis und sind nicht zugänglich.

4.5.5.1 Theoretische Grundlagen

Als industrieller Standard für einseitig verglaste Solarmodule kann derzeit eine Zellenanzahl von 60 kristallinen Standardsiliziumsolarzellen je Modul angesehen werden [Bunner 2010], [Jungbluth *et al.* 2012]. Dies deckt sich mit den Angaben von [Forstner *et al.* 2014] und Produktdatenbanken wie beispielsweise [ENF Ltd. 2014]. Laut [Forstner *et al.* 2014] besitzen solche Solarmodule einen Weltmarktanteil von über 90 %. Ersten Prognosen zufolge ist nicht vor 2018 mit signifikanten Marktanteilen anderer Modulkonzeptionen zu rechnen. Die größten Potenziale werden dabei größeren Solarmodulen mit 72 Zellen je Modul sowie Spezialanfertigungen und doppelverglasten Solarmodulen zugeschrieben. Weiter finden die bereits in den vorhergehenden Kapiteln als Standard definierten Zellengrößen der Kantenabmessungen von 15,6 cm x 15,6 cm primär Anwendung; ungeachtet der jeweiligen Kristallqualität. Der konzeptionelle Aufbau eines solchen Standardsolarmoduls orientiert sich dabei am bereits im Kapitel 4.5.1.1 auf Seite 209 (Abbildung 4-20) dargestellten Querschnitt inklusive der sich anschließenden Betrachtungen. Die Kantenabmessungen liegen typischerweise bei circa 162 cm (Länge) x 98,6 cm (Breite) x 4 cm (Tiefe) [Jungbluth *et al.* 2012]. Die Angaben verstehen sich dabei inklusive des Aluminiumrahmens, können jedoch herstellerspezifisch geringfügig abweichen [ENF Ltd. 2014].

Die nachstehende Abbildung 4-48 zeigt die Prozessabfolge zur Fertigung eines solchen Standardsolarmoduls. Diese gilt gleichbedeutend für Standardsolarmodule auf Basis monokristalliner und multikristalliner Siliziumsolarzellen, da die einzelnen Produktionsschritte für beide Kristallqualitäten nicht voneinander abweichen. Die Bezeichnung „kristalline Siliziumsolarzelle“ umfasst sonach beide Ausprägungen.

Der erste Schritt hin zum Solarmodul besteht in der elektrischen Verbindung der einzelnen Solarzellen zu einem Zellenstrang (engl.: String). Für ein fertiges Standardsolarmodul ist eine Zellenanordnung in einer 10 x 6 – Matrix charakteristisch. Dieserhalb werden gemeiniglich 10 Zellen zu einem String verlötet. Je nach Hersteller und Modultyp kann dies jedoch mitunter variieren. Der Konnex der Einzelzellen wird durch das Auflöten verzinnter Kupferbänder auf die Sammelschienen der Frontkontakte einer ersten Zelle und auf die Lötkontaktflächen der Zellenrückseite der jeweils sequenziell nachfolgenden Zelle erreicht. Die Lötstreifen sind zwischen 1,8 und 2,0 mm lang und 0,15 und 0,18 mm breit. Die verzinnten Kupferstreifen liegen für den Lötvorgang bereits

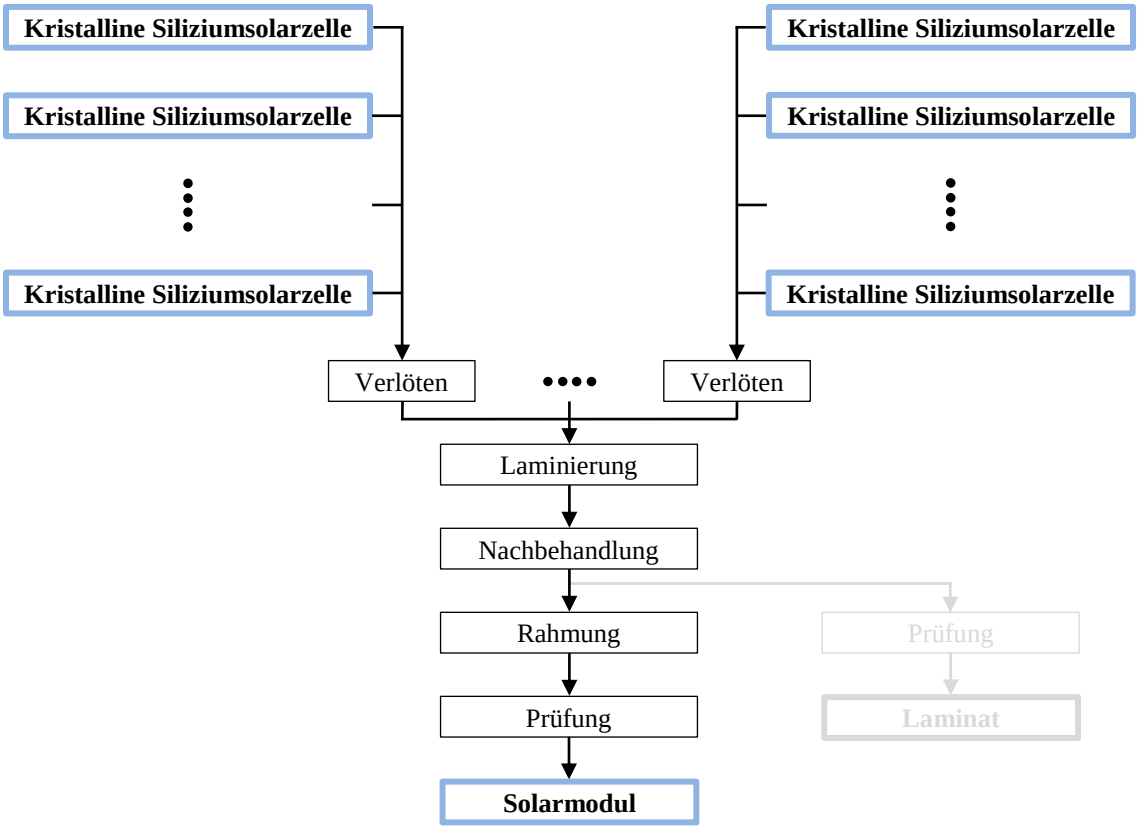


Abbildung 4-48: Produktionssequenz Standardmodul aus kristallinen Siliziumsolarzellen.

mit einer 10 – 15 µm dicken Hartlotbeschichtung aus 60 % Zinn und 40 % Blei vor. Die Verlötung der Einzelzellen, von der geometrischen Anordnung bis zum fertigen String, geschieht vollautomatisiert. Je Solarmodul kommen nur Solarzellen gleicher Leistungsklasse zum Einsatz[91], deren Einteilung zuvor in 0,1 W-Schritten erfolgte. Die einzelnen Strings werden anschließend mit ihrer konzeptionellen Vorderseite in gleichen Abständen hochsymmetrisch auf eine mittels Aceton gereinigte Glasscheibe, welche von einer Schicht EVA-Folie bedeckt ist, gelegt. Der weitere Produktionsprozess erfolgt demnach in Superstratkonfiguration. Das Glas dient somit während der folgenden Arbeitsschritte als Schutz und verleiht dem Materialverbund mechanische Stabilität. Die passgenau angeordneten Strings werden nun wiederum an dickere Sammelschiene gelötet, wodurch sich eine serielle Verschaltung aller 60 Solarzellen ergibt. Die Plus- und Minuskontakte des Gesamtstrings werden ebenfalls mittels verzinnten Kupferbändchen so verlängert, dass sie in der Mitte der kurzen Modulseite enden. Auf die Zellenmatrix wird abermals eine Schicht EVA-Folie aufgebracht, sodass die Solarzellen zwischen zwei EVA-Folien eingebettet sind. Ein Folienverbund aus beidseitig mit Polyvinylfluorid (Tedlar) kaschiertem Polyethylenterephthalat (PET) schließt letztlich den Verbundaufbau rückseitig ab.

[91] Zur Vermeidung von Leistungseinbußen infolge von Mismatching.

Bei dem verwendeten Glas handelt es sich typischerweise um speziell thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsweißglas nach EN 12150-1:2000 mit geringem Eisengehalt und einer Dichte von 2,5 g/cm³. Die Glasstärke variiert dabei herstellerspezifisch zwischen 3 und 4 mm. Um dieser Variation Rechnung zu tragen, wird in der vorliegenden Arbeit eine durchschnittliche Glasstärke der Frontscheibe von 3,5 mm zugrunde gelegt. Gelegentlich besitzt das Frontglas darüber hinaus ebenfalls eine texturierte Oberfläche oder eine zusätzliche Antireflexionsschicht.[92] Die beiden EVA-Lagen sind jeweils rund 0,5 mm dick und wurden zuvor auf eine circa 6 % größere Grundfläche, welche von der verwendeten Glasscheibe vorgegeben ist, zugeschnitten. Gleiches gilt für den Zuschnitt der Modulrückseitenfolie. Diese besteht aus einer 250 µm dicken Schicht Polyethylenterephthalat (PET), eingebettet zwischen zwei jeweils rund 38 µm starken Lagen Polyvinylfluorid (Tedlar) [ecoinvent o.J.].

Der vorliegende Materialstapel aus Glas / EVA / Solarzellen / EVA / Rückseitenfolie ist nun bereit für den nächsten Fertigungsschritt: der Laminierung. Dafür wird der Verbund einem Laminierofen (kombiniert Druck, Temperatur und Vakuum) zugeführt. Die Laminierung des bis dato losen Modulverbundes im Laminierofen wird in zwei Schritten vollzogen. Erst wird der Modulverbund auf 120 °C erhitzt, wobei gleichzeitig ein Vakuum geschaffen wird. Das EVA beginnt zu fließen und bettet so die dazwischenliegenden Zellen ein. Das Vakuum entzieht das gesamte Umgebungsgas und die Luftfeuchte, um Hohlräume zwischen den EVA-Lagen selbst und zwischen den EVA-Lagen und dem Frontglas, beziehungsweise der Rückseitenfolie auszuschließen. In der zweiten Phase wird der Verbund auf 150 °C erhitzt, wobei das Vakuum beibehalten wird. Zusätzlich wird der Materialstapel mittels Druck zusammengepresst, um durch Einschlüsse zwischen den Materialien zurückgebliebene Gase ebenfalls zu entfernen. Das EVA beginnt sich dreidimensional zu vernetzen und nimmt dabei eine glasklare Gestalt an. Diese dreidimensionale Vernetzung verleiht dem Verbund Festigkeit und bindet das Frontglas und die Modulrückseitenfolie an die jeweilige EVA-Schicht. Nach der Abkühlung des Modulverbundes wird dieser aus dem Laminierofen entfernt. Es liegt nun ein fest vernetzter und luftfreier Materialverbund vor, der einigen Nachbehandlungs-

[92] Bei der Spezifikation des verwendeten Frontglases geht die Tendenz deutlich in Richtung einer zusätzlichen Antireflexionsschicht. Dies ergeben Recherchen in Produktdatenbanken wie beispielsweise [ENF Ltd. 2014]. Aus folgenden Gründen wird in der vorliegenden Arbeit jedoch ein Frontglas ohne zusätzliche Antireflexionsbeschichtung zugrunde gelegt: **1.** Die Verwendung/Absenz einer AR-Schicht variiert sowohl von Hersteller zu Hersteller, als auch herstellerintern von Modultyp zu Modultyp. **2.** Es sind keine öffentlichen Informationen über die Zusammensetzung, die verwendete Schichtdicke und den zugrunde liegenden Produktionsprozess (Beschichtung) verfügbar. **3.** Frontglas mit einer zusätzlichen AR-Schicht findet erst seit wenigen Jahren sukzessive Einzug in die Modulfertigung.

schritten unterzogen wird. Zum einen werden die ob ihrer 6 % größeren Grundfläche über das Frontglas stehenden EVA- und Rückseitenfolien[93] rundumher und passgenau abgetrennt. Daran schließt sich eine „Versiegelung“ der Modulkanten mit Silikon an, um ein späteres potenzielles Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern. Zum anderen wird die Modulanschlussdose auf der Modulrückseite angebracht und die elektrischen Verbindungen vollzogen. Dafür werden die Enden der verlängerten Plus- und Minuspole des Gesamtstrings und je nach Menge der verwendeten Bypassdioden eine bestimmte Anzahl an Zwischenverbindungen durch definierte Stellen mittig der kurzen Modulseite gezogen. Die Lage dieser „Löcher“ orientiert sich an der Lokalisierung der Modulanschlussdose. In der Modulanschlussdose werden die Teilstrings parallel zu den Bypassdioden geschalten.

Abbildung 4-49 zeigt beispielhaft das Grundprinzip der Verschaltung von 28 Solarzellen mit 2 Bypassdioden zu 2 Teilstrings. Die Darstellung orientiert sich an der Abbildung 4-19 des Kapitels 4.5.1.1: „Modulbestandteile und Konzeption“.

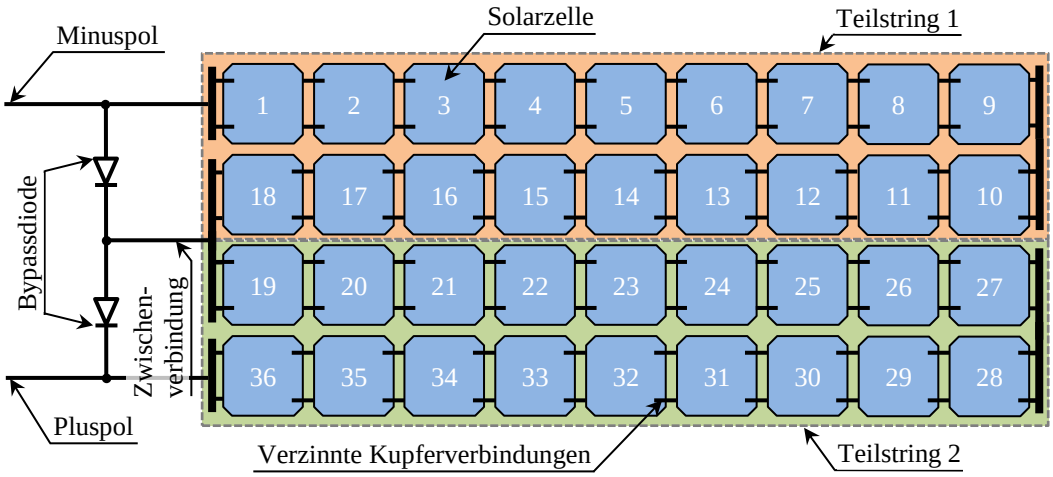


Abbildung 4-49: Grundprinzip der Verschaltung von 28 Solarzellen zu 2 Teilstrings mit 2 Bypassdioden.

Die Modulanschlussdose ist so dimensioniert, dass sie die „Anschlusslöcher“ zur Kontaktierung der Teilstrings vollständig verdeckt. Nach der Kontaktierung wird die Verbindung zwischen Anschlussdose und Modulrückseite ebenfalls mit Silikon versiegelt, damit keine Feuchtigkeit durch die Anschlusslöcher in das Innere des Solarmoduls gelangen kann.

[93] Der abgetrennte überschüssige Rand (EVA und Rückseitenfolie) fällt zwar als Fraktion hochrein an, ist jedoch technisch nur sehr schwer wieder zu trennen.

Je nach Hersteller unterscheidet sich die Anzahl[94] der verwendeten Bypassdioden und damit der gebildeten Teilstrings. Die Modulanschlussdosen bestehen aus spritzgegossenem Polyphenylenoxid, welche herstellerspezifisch IP65 oder IP67[95] zertifiziert sind.

Letzter Fertigungsschritt vor der abschließenden Funktions- und Leistungsprüfung ist die Rahmung des laminierten Materialverbundes. Wird indes auf eine Rahmung verzichtet, trägt eine nach dem beschriebenen Fertigungsschema erfolgreich getestete Baugruppe die Bezeichnung „Laminat“[96]. Der Unterschied zwischen einem photovoltaischen Laminat und einem Solarmodul ist folglich die Absenz / die Montage eines Rahmens.

Der Rahmen eines einseitig verglasten Standardsolarmoduls besteht fast immer aus einer eloxierten und stranggepressten Aluminiumlegierung (AlMg3). Dieses Material wird weltweit herstellerübergreifend verwendet. Ausnahmen bilden Sonderanfertigungen. Meist wird ein Hohlkammerprofil ob der einfachen Montagemöglichkeit mittels rechtwinkligen Rahmenecken als Steckverbinder verwendet. Bei der Installation des Modulrahmens muss darauf geachtet werden, dass dieser elektrisch isoliert vom eigentlichen Stromkreislauf des Solarmoduls angebracht wird. Die Profile sind allseitig mit Abtropflöchern versehen, um der Ansammlung von Kondenswasser vorzubeugen. Aus Kostengründen erfolgte über die Jahre eine Reduzierung des verwendeten Materials auf derzeit circa 0,5 kg AlMg3 je laufendem Meter Rahmenprofil [Jungbluth *et al.* 2012], [Forstner *et al.* 2014]. [Forstner *et al.* 2014] geht von einer weiteren Reduktion des verwendeten Materials ob erwünschter Produktionskostensenkungen auf 0,4 kg AlMg3 je laufendem Meter Rahmenprofil bis 2016 und auf 0,3 kg AlMg3 je laufendem Meter Rahmenprofil bis 2024 aus.

Im Anschluss an die Rahmung wird das fertige Solarmodul mehreren standardisierten Tests unterzogen. Neben optischen Prüfverfahren zur Detektion von Zellenbrüchen, Gaseinschlüssen im Laminat oder sonstigen produktionsbedingten Defekten am Solarmodul wird die Leistungsfähigkeit jedes hergestellten Solarmoduls unter Standardtestbedingungen in einem Sonnensimulator vermessen. Daraufhin werden erfolgreich

---

[94] Variiert zwischen zwei, drei oder sechs Bypassdioden je Modul.

[95] Die IP-Zertifizierung definiert den Schutzgrad eines Gehäuses gegen Berührungen und Wasser. IP steht für „International Protection“. Die erste Kennziffer gibt den Grad des Schutzes gegen Fremdkörper (Staub) und gegen Berührung an. Der Wert 6 steht für den höchsten Schutzgrad. Die zweite Kennziffer gibt den Grad des Schutzes gegen Wasser an. Höchster Wert ist die Kennziffer 9.

[96] Die Bezeichnung „Laminat“ ist technisch nicht korrekt. Der Begriff gilt jedoch als eingebürgert. [Welter 2014]

getestete Solarmodule nach ihrer jeweiligen Leistungsklasse sortiert, um bei der späteren Verschaltung zu einem Solargenerator keine Einbußen infolge von Mismatching zu generieren (analog der abschließenden Klassifizierung bei der Solarzellenproduktion).

Ein nach dem Fertigungsschema der Abbildung 4-48 auf Seite 273 produziertes einseitig verglastes Solarmodul auf Basis kristalliner Standardsiliziumsolarzellen genügt in seinen Spezifikationen allen in der IEC 61215-Zertifizierung geforderten Ansprüchen (vgl. Kapitel 4.5.1.1: „Modulbestandteile und Konzeption“ i.V.m. [TÜV Rheinland 2010]) und weist zusammengefasst folgende Attribute und Kennwerte auf:

- 60, nach Kapitel 4.5.4: „Produktion kristalliner Siliziumsolarzellen“ definierte, kristalline Standardsiliziumsolarzellen; angeordnet in einer 6 x 10 – Matrix; unterteilt in 3 Teilstrings mit 3 Bypassdioden, welche in einer Modulanschlussdose aus Polyphenylenoxid auf der Modulrückseite elektrisch verschalten sind,
- Kantenabmessungen inklusive Aluminiumprofil: 162 cm (Länge) x 98,6 cm (Breite) x 4 cm (Tiefe),
- Aluminiumrahmen als Hohlkammerprofil aus 0,5 kg AlMg3 je laufenden Meter (stranggepresst und eloxiert),
- Materialschichtung als Superstratkonfiguration der Abfolge Glas / EVA / Solarzellen / EVA / Rückseitenfolienverbund,
- Frontscheibe aus 3,5 mm starkem, speziell thermisch vorgespanntem Kalknatron-einscheibensicherheitsweißglas nach EN 12150-1:2000 mit geringem Eisengehalt,
- Zwei 0,5 mm dicke EVA-Schichten,
- Sammelschienen und Zellenverbindungen aus verzinnten Kupferstreifen mit einer 10 – 15 µm dicken Lötlegierung aus 60 % Zinn und 40 % Blei,
- Versiegelung der Modulkanten und der Modulanschlussdose mittels Silikon,
- eine Standardleistung von 240 W_p[97] und
- demnach einem Wirkungsgrad von 15 %[98].

[97] Ergibt sich aus 60 Einzelzellen zu je 4 W_p spezifischer Zellenleistung (sortiert).

[98] 240 Wp Leistung bezogen auf die Modulfläche entspricht einer Leistung von 150,25 Wp/m². Bei einer Bestrahlungsrate von 1.000 W/m² unter Standardtestbedingungen (vgl. Kapitel 2.4.2: „Standardtestbedingungen“) ergibt sich der Wirkungsgrad aus dem umgewandelten Anteil.

4.5.5.2 Stoffliche und energetische Betrachtungen

Die Fertigungsschritte zur Produktion des beschriebenen Standardsolarmoduls auf Basis kristalliner Siliziumsolarzellen sind für beide Kristallqualitäten identisch. Dieserhalb gelten nachstehende Betrachtungen und Tabellen gleichbedeutend für die Verwendung von monokristallinen und multikristallinen Siliziumsolarzellen.

Tabelle 4-24 zeigt alle für den in Abbildung 4-48 dargestellten Produktionspfad eines Standardsolarmoduls benötigten Material- und Energieströme. Die Daten basieren auf den Einzelprozessrohdaten nach [Jungbluth *et al.* 2012], welche sich vollständig im Anhang 4-10 wiederfinden. Abweichende Positionen sind gesondert gekennzeichnet.

Tabelle 4-24: Stoff- und Energieströme in der Fertigung kristalliner Standardsiliziumsolarmodule.

	je Standardsolarmodul$_{sc/mc}$ per Definition	**Menge**	**Einheit**	**Bemerkung**
Input	**Solarzelle$_{sc/mc}$**	1,489	m²	Inklusive 2 % Ausschuss; Ø 61,2 Zellen pro Modul zu je 243,36 cm²
	Strom	7,52	kWh	
	Prozesswärme	8,64	MJ	Aus Erdgas
	Glas	14,118	kg	3,5 mm starkes, thermisch vorgespanntem Kalknatron-einscheibensicherheitsweißglas mit geringem Eisengehalt, inkl. 1 % Verlust; neu berechnet
	Ethylenvinylacetat (EVA)	1,6	kg	Zwei Schichten jeweils 0,5 mm dick und 6 % größerer Ausgangsfläche
	Polyethylenterephthalat (PET)	584,14	g	Rückseitenbeschichtung, 6 % größerer Ausgangsfläche; neu berechnet
	Polyvinylfluorid (Tedlar)	227,76	g	
	Aluminiumlegierung	2,606	kg	AlMg3, stranggepresst und eloxiert; neu berechnet
	Kupfer	180,5	g	Kupferstreifen für Kontaktierung
	Lötlegierung	13,99	g	Sn60Pb40 Hartlotbeschichtung
	Polyphenylenoxid	300,3	g	Modulanschlussdosenmaterial
	Silikon	194,9	g	Versiegelung
	Aceton	20,77	g	Reinigung Glas
	Bypassdiode	3	Stk	

Die in der Tabelle 4-24 aufgeführten Werte des benötigten Inputs an Glas, Aluminiumlegierung und der Materialien der Rückseitenverbundfolie wurden auf Basis der im vorangegangenen Kapitel angegebenen Daten neu berechnet. Die Menge des verwendeten Glases je produzierten Standardsolarmodul ergibt sich aus der benötigten Grundfläche (1,62 m x 0,986 m) multipliziert mit der Glasstärke (3,5 mm) und dessen Dichte, zuzüglich 1 % Verlust. Die Menge der benötigten Aluminiumlegierung zur vollständigen Umrahmung des Moduls ist das Produkt aus dem Modulumfang und dem

aktuell formabhängigen Materialgehalt (0,5 kg AlMg3 je laufendem Meter Rahmenprofil). Bei beiden Komponenten des Rückseitenfolienverbundes ist zu beachten, dass der Verschnitt in der für die Modulfertigung initial benötigten Menge enthalten sein muss. Sonach ergibt sich die benötigte Menge beider Materialien aus deren jeweiligen Dichten (Tedlar: 1,77 g/cm³ und PET: 1,38 g/cm³) multipliziert mit deren jeweils verarbeiteten Schichtdicke (Tedlar zu 2 x 38 µm enthalten) und der Grundfläche inklusive Verschnitt (1,62 m x 0,986 m x 1,06 Verschnittfaktor).

Weiter beziehen sich die Angaben in der Tabelle 4-24 auf die reine Fertigung eines Standardsolarmodul mit jenen im Kapitel 4.5.5.1 definierten Attributen. Jeder dieser Werte muss mit Blick auf das Endprodukt: ein geprüftes, fehlerfreies und vertriebsfähiges Standardsolarmodul per Definition ob eines supponierten Produktionsausschusses von 1 % ([Jungbluth *et al.* 2012], [ecoinvent Association 2014]) zusätzlich mit dem entsprechenden Verlustfaktor multipliziert werden. Zur Vergleichbarkeit der Werte mit Statistiken und Angaben anderer Autoren können die angegebenen und angepassten Inputmengen beliebig umgerechnet werden. Eine Umrechnung der Werte auf beispielsweise die benötigte Menge je Quadratmeter produziertes Standardsolarmodul kann dabei über einen Flächenfaktor erfolgen. Dieser ergibt sich aus dem Quotienten der Bezugsfläche und der tatsächlichen Fläche. Die Bezugsfläche bildet den Dividenden und würde sonach 1 m² betragen. Der Divisor ergibt sich aus der Grundfläche des Standardsolarmoduls (1,62 m x 0,986 m) zu 1,5973 m², was einen Flächenfaktor in Höhe von 0,626 zeitigt.

4.5.6 Zusammenfassende Betrachtungen zur Produktion von Standardsolarmodulen auf Basis der kristallinen Siliziumsolartechnologie

Die in den vorangegangenen Kapiteln zu den einzelnen Produktionsschritten eines Standardsolarmoduls auf Basis kristalliner Siliziumsolarzellen aufgeführten Inputdaten sind Abbild der auf jeder Fertigungsstufe benötigten Stoff- und Energieströme zur Produktion der jeweils ausgewiesenen Einheit. Wenngleich eine kumulierte Betrachtung dieser fertigungsstufenspezifischen Inputdaten einen Gesamtüberblick nach Art und Quantität aller zur Herstellung des definierten Standardsolarmoduls benötigten Materialien liefert, können die so gewonnen Ergebnisse nicht den tatsächlichen Materialgehalt eines Standardsolarmoduls abbilden. Dieserhalb erfolgt darauf aufbauend eine Eingrenzung der gesamten aufgeführten Repetierfaktoren mit Blick auf die tatsächlich im Endprodukt „kristallines Standardsolarmodul“ enthaltenen Materialien. Mittels einer Analyse der fertigungsstufen- und materialspezifischen Verluste sowie einzelnen physikalischen Gegebenheiten der betreffenden Materialien während der Produktion können sonach über die Berechnung von Stufenfaktoren gleichwohl die Mengen der einzelnen Bestandteile, deren Differenz zum jeweils benötigten Produktionsinput sowie allgemein gültige Mindestverluste je übergeordneter Fertigungsstufe ermittelt werden.

Grundlage der nachfolgenden Betrachtungen und Berechnungen bildet das zuvor definierte kristalline Standardsiliziumsolarmodul und dessen Produktionspfad nach den in den Kapiteln 4.5.2 bis 4.5.5 separat beschriebenen Fertigungsstufen. Eine übersichtliche Zusammenfassung dieser stufenweise betrachteten Produktionssequenz findet sich im Anhang 4-11. inklusive dem Verweis zum jeweils behandelnden Kapitel.

Die nachstehende Übersicht fasst den Produktionsinput der einzelnen Fertigungsstufen aus den separaten Kapiteln in einer Tabelle zusammen und gibt darüber hinaus durch eine kumulierte Betrachtung dieser fertigungsstufenspezifischen Inputdaten einen Gesamtüberblick nach Art und Quantität aller zur Herstellung des definierten Standardsolarmoduls benötigten Materialien. Zur Vereinheitlichung der Darstellung und zur Vereinfachung der sich daran anschließenden Betrachtungen wurden die stufenspezifischen Einzelinputdaten der Waferfertigung sowie der Solarzellenproduktion mittels eines Flächenfaktors (243,36 cm²) in die benötigte Menge je Stück umgerechnet.

Tabelle 4-25: Zusammenfassende Übersicht aller benötigten Stoff- und Energieströme der einzelnen Fertigungsstufen von der MGS Herstellung bis zur Produktion einer Einheit des definierten Standardsolarmoduls sowie die Angabe der kumuliert benötigten Energie- und Stoffströme über alle Fertigungsstufen. (gerundete Werte)

	Input der Fertigungsstufen	Einheit	Fertigungsstufe										Geprüftes Endprodukt	
			MGS	SGS_p	SGS_{sc}	SGS_{mc}	$Wafer_{sc}$	$Wafer_{mc}$	$Zelle_{sc}$	$Zelle_{mc}$	$Modul_{sc}$	$Modul_{mc}$	$Modul_{sc}$	$Modul_{mc}$
			kg	kg	kg	kg	Stk	Stk	Stk	Stk	Stk	Stk	Stk	Stk
Energie	**Strom**	kWh	11	110	85,6	19,3	0,1946		0,736		7,52			
			11	122,43	216,6	158,87	4,124	3,077	5,124	4,009	321,08	252,89	324,325	255,445
	Wärme	MJ	23,1	185	68,2		0,0973		0,1314		8,64			
			23,1	211,1	294,08	240,657	5,432	4,463	5,911	4,88	370,391	307,287	374,133	310,391
Siliziumsurrogat	**Quarz**	kg	2,7											
			2,7	3,051	3,265	3,478	0,059	0,063	0,063	0,067	3,856	4,108	3,895	4,1499
	MGS	kg		1,13										
			1,13	1,209	1,288	0,022	0,023	0,023	0,025	1,428	1,522	1,4426	1,537	
	SGS_p	kg			1,07	1,14								
			1,07	1,14	0,019	0,021	0,021	0,022	1,264	1,347	1,2767	1,3602		
	$SGS_{sc/mc}$	kg					0,01814							
			0,01814	0,01814	0,019	0,019	1,181	1,181	1,193	1,193				
	$Wafer_{sc/mc}$	Stk							1,064					
			1,064	1,064	65,117	65,117	65,775	65,775						
	$Zelle_{sc/mc}$	Stk									61,2			
			61,2	61,2	61,82	61,82								
	$Modul_{sc/mc}$	Stk											1,0101	
			1,0101	1,0101										
Repetierfaktoren	**$Aceton_{fl}$**	g			49						20,77			
			49	0,889	0,946	78,65	20,77	79,444	20,98					
	Acrylbindemittel (34 % in H_2O)	g					0,049							
			0,049	0,049	0,052	0,052	3,169	3,169	3,2014	3,2014				
	Aluminium	g							1,3998					
			1,3998	1,3998	85,668	85,668	86,5335	86,5335						
	Aluminium-legierung	kg									2,606			
			2,606	2,606	2,632	2,632								
	$Ammoniak_{fl}$	g							0,164					
			0,164	0,164	10,038	10,038	10,14	10,14						
	$Argon_{fl}$	g			5.790	267			0,625					
			5.790	267	105,031	4,843	112,38	5,779	6.877,53	353,662	6.947	357,23		
	Bor	mg			0,412	0,439								
			0,412	0,439	0,007	0,008	0,008	0,008	0,487	0,519	0,4916	0,5238		
	Bypassdiode	Stk									3			
			3	3	3,0303	3,0303								
	demineralisiertes Wasser	kg							3,34					
			3,34	3,34	204,415	204,415	206,48	206,48						
	DPM	g					7,301							
			7,301	7,301	7,768	7,768	475,405	475,405	480,207	480,207				
	Essigsäure (98 %ig)	g			107,97		0,949		0,069					
			107,97	2,908	0,949	3,163	1,079	193,554	66,018	195,509	66,684			
	Ethanol	g							0,016					
			0,016	0,016	0,953	0,953	0,963	0,963						
	Ethylenvinyl-acetat (EVA)	kg									1,6			
			1,6	1,6	1,6162	1,6162								
	Fluorwasserstoff	g			50,66				0,917					
			50,66	0,919	1,895	0,917	115,99	56,149	117,16	56,716				
	Glas	kg									14,118			
			14,118	14,118	14,26	14,26								
	Glaswolle	g					0,243							
			0,243	0,243	0,259	0,259	15,847	15,847	16,007	16,007				
	Graphit	kg	0,1											
			0,1	0,113	0,121	0,129	0,002	0,002	0,002	0,002	0,143	0,152	0,1443	0,1537
	Hackschnitzel	kg	1,35											
			1,35	1,526	1,632	1,739	0,03	0,032	0,032	0,034	1,928	2,054	1,9476	2,075
	$Helium_{gas}$	g				0,119								
			0,119	0,002	0,002	0,141	0,142							
	Holzkohle	g	170											
			170	192,1	205,547	218,994	3,729	3,973	3,967	4,227	242,796	258,68	245,25	261,29
	Isopropanol	g							1,92					
			1,92	1,92	117,511	117,511	118,7	118,7						

Fortsetzung **Tabelle 4-25** (gerundete Werte)

Input der Fertigungsstufen		Einheit	Fertigungsstufe: MGS	SGS_p	SGS_{sc}	SGS_{mc}	$Wafer_{sc}$	$Wafer_{mc}$	$Zelle_{sc}$	$Zelle_{mc}$	$Modul_{sc}$	$Modul_{mc}$	Geprüftes Endprodukt: $Modul_{sc}$	$Modul_{mc}$
			kg	kg	kg	kg	Stk	Stk	Stk	Stk	Stk	Stk	Stk	Stk
Repetierfaktoren	**Kupfer**	g									180,5			
											180,5	180,5	182,323	182,323
	Lötlegierung	g									13,99			
											13,99	13,99	14,131	14,131
	Messing (Sägedraht)	g					0,18							
							0,18	0,18	0,192	0,192	11,727	11,727	11,845	11,845
	Monosilan	g							0,029					
									0,029	0,029	1,802	1,802	1,82	1,82
	Natrium-hydroxid	g					0,365		3,821					
							0,365	0,365	4,209	4,209	257,6	257,6	260,2	260,2
	Natronlauge (50 %ig)	g		350	41,53									
				350	416,03	399	7,547	7,238	8,03	7,701	491,422	471,306	496,386	476,067
	organische Löse- und Bindemittel	g							0,323					
									0,323	0,323	19,794	19,794	19,99	19,99
	PEG (TEG)	kg					0,066							
							0,066	0,066	0,07	0,07	4,294	4,294	4,338	4,338
	Petrolkoks	g	500											
			500	565	604,55	644,1	10,967	11,684	11,668	12,432	714,106	760,823	721,32	768,508
	Phosphoroxy-chlorid	g							0,039					
									0,039	0,039	2,368	2,368	2,392	2,392
	Polyethylen-terephthalat	g									584,14			
											584,14	584,14	590,04	590,04
	Polyphenylen-oxid	g									300,3			
											300,3	300,3	303,33	303,33
	Polyvinylfluorid (Tedlar)	g									227,76			
											227,76	227,76	230,061	230,061
	Salpetersäure (50 %ig)	g			94,68									
					94,68		1,717		1,827		111,838		112,967	
	Salzsäure (30 %ig)	g		1.600			0,066		1,11					
				1.600	1.712	1.824	31,121	33,153	34,223	36,385	2.094,44	2.226,74	2.115,6	2.249,23
	Sauerstoff$_{fl}$	g	20						2,48					
			20	22,6	24,182	25,764	0,439	0,467	2,947	2,977	180,33	182,199	182,152	184,04
	Silber	g							0,1					
									0,1	0,1	6,12	6,12	6,182	6,182
	Silikon	g									194,9			
											194,9	194,9	196,87	196,87
	Siliziumcarbid	kg					0,064							
							0,064	0,064	0,068	0,068	4,168	4,168	4,21	4,21
	Siliziumdioxid	g							0,0525					
									0,0525	0,0525	3,213	3,213	3,245	3,245
	Stahl (Sägedraht)	kg					0,036							
							0,036	0,036	0,038	0,038	2,349	2,349	2,373	2,373
	Stickstoff$_{fl}$	g				46,75			45,022					
						46,75		0,848	45,022	45,924	2.755,32	2.810,54	2.783,15	2.838,93
	Tetrafluor-ethylen	g							0,077					
									0,077	0,077	4,706	4,706	4,754	4,754
	Wasserstoff$_{fl}$	kg		0,05										
				0,05	0,054	0,057	0,001	0,001	0,001	0,001	0,063	0,067	0,064	0,068
	Σ Blei und Bismut	g							0,009					
									0,009	0,009	0,542	0,542	0,5476	0,5476

Legende:

0,119 → benötigte Menge auf betreffender Stufe i zur Produktion der jeweils ausgewiesenen Einheit
0,119 → kumuliert benötigte Menge aller vorgelagerten Stufen einschließlich Stufe i

→ kein benötigter Einsatz auf betreffender Stufe i
0,052 → kumuliert benötigte Menge aller vorgelagerten Stufen einschließlich Stufe i

0,487 → über alle Fertigungsstufen kumuliert benötigte Menge zur Produktion einer geprüften und funktionsfähigen Einheit des definierten Standardsolarmoduls

Der Tabelle 4-25 sind folgende Informationen zu entnehmen:

1. Jedwede zur Produktion eines durch den vorgegebenen Produktionspfad definierten Standardsolarmoduls notwendigen Stoff- und Energieströme sind in einer Übersicht zusammengefasst. Sonach kann der benötigte Input je Fertigungsstufe zur Produktion der jeweils ausgewiesenen Einheit (Spalten) direkt entnommen werden. Diese Angaben befinden sich jeweils im oberen und blau hinterlegten Segment der betreffenden Tabellenzelle in der betrachteten Spalte. So benötigt beispielshalber die Produktion einer ausgewiesenen Einheit (ein Kilogramm) eines multikristallinen SGS-Ingots 19,3 kWh elektrische Energie; 1,14 kg polykristallines Silizium; 267 g Argon; 0,439 mg Bor et cetera.
2. Angaben in den oberen und blau hinterlegten Zellensegmenten einer einzeln betrachteten Tabellenzeile zeigen die gesamte okkasionelle Verwendung eines Inputfaktors inklusive der zugehörigen Fertigungsstufe. So werden beispielsweise 49 g flüssiges Aceton zur Produktion von einem Kilogramm eines monokristallinen SGS-Ingots sowie 20,77 g Aceton bei der Modulfertigung selbst benötigt.
3. Das untere Segment jeder Zelle beschreibt die kumuliert benötige Menge des in der betreffenden Tabellenzeile ausgewiesenen Inputs. Im Falle der als Repetierfaktoren deklarierten Substanzen (Tabellenzeile) wird sonach der Gesamtbedarf der Substanz ab der initialen Einbringungsstufe bis inklusive der betrachteten Fertigungsstufe (Tabellenspalte) dargelegt. Mit Blick auf den Gesamtbedarf hin zur Produktion einer Einheit des fixierten Outputs ist der entsprechenden Tabellenzeile so selbst bei Absenz des spezifischen Repetierfaktors auf der betrachteten Fertigungsstufe der Repetierfaktor durch den Bedarf während vorgelagerter Produktionsschritte zu entnehmen. Dies wird am Beispiel von Graphit deutlich. Während zur Produktion eines Kilogramm MGS circa 0,1 kg Graphit benötigt werden, kumuliert sich diese Menge zur Produktion eines Kilogramm polykristallinem SGS zu 0,113 kg auf, obwohl bei einer separaten Betrachtung der Fertigungsstufe von polykristallinem SGS selbst kein Graphit benötigt wird. Grund ist die Notwendigkeit von 1,13 kg MGs zur Produktion eines Kilogramm polykristallinem SGS und der damit verbundene multiplikative Anteil von Graphit während der MGS-Produktion; also eine Funktion der stufenspezifischen Materialeffizienz entlang der Betrachtungsebene Silizium. Das Endresultat dieser Betrachtungsweise ufert im nächsten Punkt.

4. In den beiden letzten Tabellenspalten ist in den jeweils unteren Zellensegmenten (orange hinterlegt) der kumulierte Bedarf jedweder, zur Produktion des geprüften Standardsolarmoduls per Definition, als Repetierfaktor ausgewiesenen Substanz sowie der energetischen Inputs enthalten. Sonach lässt sich festhalten: Zur Produktion einer funktionsfähigen Einheit des definierten Standardsolarmoduls auf Basis monokristalliner Solarzellen werden stofflich insgesamt circa 79,4 g flüssiges Aceton; 3,2 g Acrylbindemittel (34 % in H_2O), 86,53 g Aluminium et cetera benötigt - es zeigt sich folglich eine „und-Beziehung“. Gleichwohl lässt sich durch den Vergleich der kumulierten Repetier- und energetischen Inputfaktoren der Unterschied im Gesamtproduktionsbedarf zwischen einem multikristallinem und monokristallinem Standardsolarmodul manifestieren.
5. Im Falle der Siliziumsurrogate handelt es sich indes um eine Art „oder-Beziehung“. Zur reinen Produktion eines Standardsolarmoduls bedarf es 61,2 Zellen. Da zur Fertigung einer Zelle 1,064 Wafer benötigt werden, kann der benötigte Input in Siliziumsurrogaten äquivalent über die stufenspezifische Materialeffizienz entlang der Betrachtungsebene Silizium ausgedrückt werden. Folglich werden für ein geprüftes und vertriebsfähiges Standardsolarmodul auf Basis monokristalliner Siliziumsolarzellen entweder rund 1,0101 produzierte Module; 61,82 Zellen; 65,775 Wafer; 1,193 kg monokristallines SGS; 1,2767 kg polykristallines Silizium; 1,4426 kg MGS oder 3,895 kg Quarz benötigt.
6. Dem Tabellenauszug entsprechend der Siliziumsurrogate sind zusätzlich zwei weitere wichtige Informationen zu entnehmen. Einerseits zeigen die in diesem Tabellenausschnitt blau hinterlegten Zellensegmente[99] stufenspezifische Einzelproduktionsmultiplikatoren (nachstehend mit *EPM* abgekürzt) als Funktion der Materialeffizienz beziehungsweise der ausschussbedingen Stufenverluste entlang der Betrachtungsebene Silizium und andererseits stufenspezifische kumulierte Produktionsmultiplikatoren (nachstehend mit *kPM* abgekürzt) in den orange hinterlegten Zellensegmenten[100]. Auf die Bedeutung beider Multiplikatoren und sich daraus ergebende Schlussfolgerungen soll nun im Folgenden der Fokus gelegt werden, weshalb sie in Tabelle 4-26 nochmals strukturiert zusammengefasst vorliegen.

[99] Exklusive der Zeile betreffend dem als Siliziumsurrogat ausgewiesenem Input Quarz.

[100] Siehe vorhergehende Fußnote.

Tabelle 4-26: Zusammenfassung aller Einzel- und kumulierten Produktionsmultiplikatoren der Surrogate der verschiedenen Fertigungsstufen in der Betrachtungsebene Silizium bezüglich einer Einheit des ausgewiesenen Endproduktes. (gerundete Werte)

	Stufenspezifische Produktions-multiplikatoren	**Siliziumsurrogat**					
		MGS	**SGS_p**	**$SGS_{sc/mc}$**	**$Wafer_{sc/mc}$**	**$Zelle_{sc/mc}$**	**$Modul_{sc/mc}$**
	Einheit	kg	kg	kg	Stk	Stk	Stk
sc	**EPM_f**	1,13	1,07	0,01814	1,064	61,2	1,0101
sc	**kPM_f**	1,44264	1,2767	1,19315	65,775	61,8182	1,0101
mc	**EPM_f**	1,13	1,14	0,01814	1,064	61,2	1,0101
mc	**kPM_f**	1,53702	1,3602	1,19315	65,775	61,8182	1,0101
	Stufenindikator f	1	2	3	4	5	6

Die in der Tabelle 4-26 als *EPMs* deklarierten Faktoren geben sonach die direkte Beziehung zwischen zwei, dem dargelegten Fertigungsschema (vgl. Kapitel 4.5.2 bis 4.5.5 und Anhang 4-11) folgend, benachbarten Fertigungsstufen wieder. Wenngleich sie den Input einer Fertigungsstufe multiplikativ mit der unmittelbar nachfolgenden Fertigungsstufe verknüpfen, sind sie für fertigungsstufenübergreifende Betrachtungen, speziell für kumulierte Betrachtungen aller Inputfaktoren zur Produktion eines Standardsolarmoduls, ungeeignet. Hierfür bietet sich die Verwendung der als *kPM*s deklarierten Multiplikatoren an, da sie sich aus dem Produkt aller *EPMs* von der letzten bis zur betrachtungsrelevanten Fertigungsstufe ergeben. Mittels der *kPM*s kann folglich der von der jeweiligen Einbringungsstufe *f* abhängige inputspezifische Gesamtbedarf zur Produktion des Endproduktes (geprüftes Standardsolarmodul) direkt berechnet werden. Es gilt:

$$Inputspezifischer\ Gesamtbedarf = \sum_{f=1}^{6} \left(ben\ddot{o}tigte\ Menge\ des\ Inputs\ auf\ Stufe\ f * kPM_f\right) \qquad \textbf{Formel 4-9}$$

Beispielsweise wird Aluminium lediglich bei der Produktion einer Solarzelle benötigt, was sich in einem stufenspezifischen Bedarf von 1,3998 g äußert. Der *kPM* für diese Fertigungsstufe ist kPM_5 mit 61,8182. Es ergibt sich somit nach Formel 4-9 ein Gesamtproduktionsbedarf zur Fertigung eines geprüften Standardsolarmoduls von rund 86,5 g.[101]

[101] Die Abweichung zur Angabe in der Tabelle 4-25 ist die Folge der Verwendung gerundeter Werte.

Die Verwendung der angegebenen *kPMs* hat zudem den Vorteil, dass sich Auswirkungen einer Bedarfsverringerung / -erhöhung jedweder stufenspezifischen Inputmenge auf den inputspezifischen Gesamtbedarf zur Fertigung einer Einheit des Endproduktes direkt übertragen lassen.

Der Gesamtproduktionsbedarf zur Fertigung eines monokristallinen und eines multikristallinen Standardsolarmoduls unterscheidet sich nur für jene Inputfaktoren, die mindestens einmal vor oder während der Anpassung der Kristallqualität in die Fertigung Einzug erhalten haben. Wie Tabelle 4-26 zudem zu entnehmen ist, unterscheiden sich für beide Endprodukte ebenfalls nur die auf die Fertigungsstufe $SGS_{sc/mc}$ beziehenden *EPMs*. Sonach ist die Differenz aller voneinander abweichenden Inputfaktoren für geprüfte monokristalline und multikristalline Standardsolarmodule alleinig auf diesen Fertigungsschritt zurückzuführen. Durch die multiplikative Verknüpfung der *EPMs* und *kPMs* hat dies ebenfalls Auswirkungen auf den Gesamtproduktionsbedarf aller vor diesem Fertigungsschritt eingebrachten Inputfaktoren.

Wie ist daraus nun auf den tatsächlichen stoffspezifischen Inhalt eines nach dem vorgegebenen Produktionspfad hergestellten und geprüften Standardsolarmoduls zu schließen – sprich, welche Substanzen sind mit welcher Quantität in einer als Endprodukt ausgewiesenen Einheit enthalten und kommen so prinzipiell für ein mögliches Recycling in Betracht?

4.5.6.1 Stoffliche Zusammensetzung des definierten Standardsolarmoduls

Neben einer labortechnischen Analyse der Inhaltsstoffe oder einer Deklarationsanalyse lassen sich die Inhaltsstoffe des definierten Standardsolarmoduls auch durch eine gezielte Untersuchung der zugrunde liegenden Fertigungsschritte berechnen. Hierfür müssen jedoch vorab die nachfolgenden Betrachtungsgrundlagen Beachtung finden.

1. Die in Tabelle 4-25 aufgeführten Substanzen, welche als Repetierfaktoren deklariert sind, sind nicht zwingend im Endprodukt enthalten. Betriebsstoffe wie beispielsweise Reinigungs-, Ätz- oder Sägezusatzstoffe gehen nicht materiell in das Endprodukt ein. Gleiches gilt für den ausgewiesenen energetischen Input. Eine Eingrenzung aller aufgeführten Substanzen nach technologischen und produktionsbedingten Gegebenheiten stellt sonach die Grundlage der angestrebten Untersuchung dar.
2. Für die tatsächlich stoffliche Zusammensetzung spielen fertigungsstufen- und stoffspezifische Verluste beziehungsweise Materialeffizienzen keine Rolle.
3. Aus der Gruppe der Siliziumsurrogate (vgl. Tabelle 4-25 auf Seite 281f) liegt nur mono- oder multikristallines SGS direkt im Endprodukt vor. Wenngleich Wafer und Solarzellen grundlegende Bestandteile eines Solarmoduls sind, stellen sie nur eine weiterverarbeitete und spezifizierte Form von dotiertem $SGS_{sc/mc}$ dar. So sind Solarwafer letztlich nur in der Form angepasste $SGS_{sc/mc}$ Einheiten, welche zusätzlich einer Oberflächenbearbeitung unterliegen. Für kristalline Solarzellen gilt Gleiches, nur das additional weitere verfahrenstechnische Spezifikationen beziehungsweise ein Versatz mit zusätzlichen Substanzen erfolgte. Zwar kann die stoffliche Zusammensetzung des betrachteten Endproduktes auch auf Basis von Wafer- oder Zelleneinheiten angeben werden, würde aber an dieser Stelle das Ziel der Berechnung beziehungsweise der Manifestation aller tatsächlichen Inhaltsstoffe verfehlen. Gleichwohl spielen die vor dem $SGS_{sc/mc}$ gelagerten Kristallqualitäten und -reinheiten (MGS und SGS_p) keine Rolle bei der angestrebten Betrachtung, da sie letztlich physisch nicht im Endprodukt vorliegen. In Folge der Siliziumaufreinigung und der Anpassung der Kristallqualität liegen sie gleichsam nur in ihrer reinsten und qualitativ hochwertigsten Form – als $SGS_{sc/mc}$ – im Endprodukt vor.

4. Grundlage der nachfolgenden Betrachtungen und Berechnungen bildet das als „geprüftes kristallines Standardsolarmodul“ definierte Endprodukt (im Folgenden mit $gSSM_{sc/mc}$ abgekürzt), welches nach dem in den Kapiteln 4.5.2 bis 4.5.5 bereits beschriebenen Produktionspfad gefertigt wurde. Dies gilt in gleichem Maße für beide Kristallqualitäten.

Analog der *EPMs* und deren Rolle bei der multiplikativen Verknüpfung zu den *kPMs* lassen sich inhaltsstoffbezogene stufenspezifische sowie kumulierte Multiplikatoren auf Basis der Beziehungen zwischen den einzelnen Fertigungsstufen definieren. Dabei stellt die Abkopplung von der verlustbehafteten Perspektive der vorangegangenen Betrachtungen einen essenziellen Bestandteil dar. Obgleich soll, einer leichter greifbaren Erläuterung halber, das hierarchisierte Konzept der Fertigungsstufen und damit einhergehend der stoffspezifischen Einbringungsstufen ebenfalls bei der Beschreibung der inhaltsstoffbezogenen Multiplikatoren Anwendung finden.

Tabelle 4-27 zeigt alle diskussionsrelevanten stufenspezifischen Einzelinhaltsstoffmultiplikatoren (nachstehend mit *EIM* abgekürzt) sowie die sich daraus ergebenden stufenspezifischen kumulierten Inhaltsstoffmultiplikatoren (nachstehend mit *kIM* abgekürzt).

Tabelle 4-27: Relevante Einzel- und kumulierten Inhaltsstoffmultiplikatoren der verschiedenen stoffspezifischen Einbringungsstufen in der Betrachtungsebene Silizium bezüglich einer Einheit $gSSM_{sc/mc}$.

Stufenspezifische Inhaltsstoffmultiplikatoren		**Stoffspezifische Einbringungsstufe**			
		$SGS_{sc/mc}$	**$Wafer_{sc/mc}$**	**$Zelle_{sc/mc}$**	**$Modul_{sc/mc}$**
	Einheit	kg	Stk	Stk	Stk
sc	**EIM_f**	0,0102	1	60	1
	kIM_f	0,612	60	60	1
mc	**EIM_f**	0,0102	1	60	1
	kIM_f	0,612	60	60	1
	Stufenindikator f	3	4	5	6

Entsprechend ihrer produktionsbezogenen und verlustbehafteten Pendants verknüpfen die *EIMs* multiplikativ die spezifischen Inhaltsstoffe des $gSSM_{sc/mc}$ einer Einbringungsstufe mit der jeweils unmittelbar Nachfolgenden. Sonach sind die *EIMs* direkt abhängig von den fertigungsstufenspezifischen physikalischen Gegebenheiten und Designkriterien des $gSSM_{sc/mc}$ entlang der Betrachtungsebene Silizium, weshalb sich deren Wert in einer Einzelfallbetrachtung direkt ermitteln lässt.

EIM$_3$ beispielshalber definiert sich durch die Gegebenheit, dass ein gefertigtes Standardsolarmodul aus 60 kristallinen Solarzellen besteht. Somit sind auch alle in einer Zelle enthaltenen Materialen 60-fach in einem Standardsolarmodul enthalten, unabhängig von einer inhaltsstoffspezifischen Mehrung infolge einer möglichen stufenübergreifenden Einbringung. Gleichermaßen zeitigt die Weiterverarbeitung eines Wafers zu einer Zelle den entsprechenden Wert 1 für den Multiplikator *EIM*$_2$. Im Falle von *EIM*$_1$ wird, wie bereits vielfach dargelegt, nur der tatsächliche $SGS_{sc/mc}$-Gehalt eines Wafers zugrunde gelegt. In Anlehnung an Formel 4-7 (Kapitel 4.5.3.2 auf Seite 250) ergibt sich sonach ein Wert von 0,0102 für *EIM*$_1$. Analog der *EPMs* eignen sich die *EIMs* nicht für eine stufenübergreifende Betrachtung. Zu diesem Zwecke werden sie ebenfalls multiplikativ zu *kIM*s verknüpft. So lässt sich die konkrete Menge eines Ingredienz im $gSSM_{sc/mc}$ in Abhängigkeit seiner Einbringungsstufe nach der folgenden allgemeinen Beziehung direkt berechnen.

$$inhaltsstoffspezifischer\ Gesamtgehalt\ im\ gSSM_{sc/mc} = \sum_{f=3}^{6} \begin{pmatrix} auf\ Stufe\ f\ direkt\ eingehende\ Menge \\ des\ Inhaltsstoffes * kIM_f \end{pmatrix} \quad \textbf{Formel 4-10}$$

Das setzt jedoch die Kenntnis über die tatsächlich auf Stufe *f* direkt eingehende Menge eines Inhaltsstoffes voraus. Jener stoffbezogene Wert unterscheidet sich von dessen Produktionsbedarf fertigungsstufenintern nur durch seinen spezifischen Verlust. Es lässt sich sonach ein stoffspezifischer Stufenfaktor (nachfolgend mit *SSF* abgekürzt) definieren. Die *SSF*s ergeben sich demzufolge aus den in den jeweiligen Kapiteln ausgewiesenen stoffbezogen Verlusten und dienen der Berechnung der verlustfreien und tatsächlich im jeweils ausgewiesenen Produkt vorliegenden Quantitäten. So ergibt sich der *SSF* für das Frontglas (Einbringung auf Fertigungsstufe Modul) aus dessen 1 %-igen Verlust während der Fertigung zu (1/0,99). Im Falle von EVA, PET und Tedlar (Modulrückseitenbeschichtung) berechnen sich die zugewiesenen *SSF*s aus deren benötigten Produktionsinput abzüglich des 6 %-igen Flächenüberschusses zu 1,06. Es zeigt sich folglich, dass die stoffbezogenen Stufenfaktoren nicht allgemein gültig sind. Zur Berechnung des in Formel 4-10 angegebenen verlustbereinigten, stoffspezifischen Multiplikators: „auf Stufe i direkt eingehende Menge des Inhaltsstoffes“ muss sein, auf die Produktion bezogenes, Pendant der gleichen Stufe (Multiplikator in Formel 4-9) durch den entsprechenden *SSF* dividiert werden.

Tabelle 4-28 fasst nun alle, auf der Tabelle 4-25 basierende und um die Betriebsstoffe bereinigte, im Endprodukt $gSSM_{sc/mc}$ direkt enthaltenen Erzeugnishauptstoffe und Erzeugnisnebenstoffe für beide Kristallqualitäten zusammen.

Tabelle 4-28: Zusammenfassende Übersicht aller nach Art und Quantität in einem $gSSM_{sc/mc}$ enthaltenen, beziehungsweise in Abhängigkeit der Einbringungsstufe in ein $gSSM_{sc/mc}$ eingehende Erzeugnishauptstoffe und Erzeugnisnebenstoffe. (gerundete Werte)

Quantität der Ingredienzien eines $gSSM_{sc/mc}$			Einbringungsstufe					Anteil in einem $gSSM_{sc/mc}$		
			$SGS_{sc/mc}$	$Wafer_{sc/mc}$	$Zelle_{sc/mc}$	$Modul_{sc/mc}$	SSF	absolut	prozentual	je W_p
		Einheit	kg	Stk	Stk	Stk		g	Massen-%	g
Erzeugnishaupt- und Erzeugnisnebenstoffe	**Aluminium**	g			1,3998 1,3998	 83,9884	1	83,9884	0,41467	0,35
	Aluminiumlegierung	kg				2,606 2,606	1	2.606	12,8664	10,858
	Bor	mg	0,385[a] 0,385	 (0,00393)	 (0,00393)	 (0,2356)	sc: 1,07 mc: 1,14	-	-	-
	Bypassdiode	g				0,597[b] 0,597	1	0,597	0,003	0,0025
	Ethylenvinylacetat (EVA)	kg				1,5094 1,5094	1,06	1.509,4	7,4524	6,289
	Glas	kg				13,9766 13,9766	1/0,99	13.976,6	69,0055	58,236
	Kupfer	g				180,5 180,5	1	180,5	0,8912	0,7521
	Lötlegierung	g				13,99 13,99	1	13,99	0,0691	0,0583
	Phosphor (n^+-Dotierung)	µg			<< 1[c]	 		-	-	-
	Polyethylen-terephthalat	g				551,075 551,075	1,06	551,075	2,7208	2,296
	Polyphenylenoxid	g				300,3 300,3	1	300,3	1,4827	1,251
	Polyvinylfluorid (Tedlar)	g				214,87 214,87	1,06	214,87	1,0609	0,895
	$SGS_{sc/mc}$	kg		0,0102[d] 0,0102	 0,0102	 0,612	1,7784	612	3,0216	2,55
	Silber	g			0,099997 0,099997	 5,9998	1	5,9998	0,0296	0,025
	Silikon	g				194,9 194,9	1	194,9	0,9623	0,812
	Siliziumdioxid	g			0,0525 0,0525	 3,1496	1	3,1496	0,0156	0,0131
	Siliziumnitrid	mg			6,2[e] 6,2	 372	-[e]	0,372	0,0018	0,00155
	Σ Blei und Bismut	g			0,00886 0,00886	 0,5315	1	0,5315	0,0026	0,0022
						Summe		20.254,26	100	84,39

Legende:

2,606 / 2,606 → auf betreffender Stufe i in die jeweils ausgewiesene Einheit eingehende Menge / tatsächlich in der ausgewiesenen Einheit enthaltene stoffspezifische Menge Einheit

\ / 372 → keine eingehende Menge auf betreffender Stufe i / tatsächlich in der ausgewiesenen Einheit enthaltene stoffspezifische Menge Einheit

300,3 → absolut in einer Einheit eines $gSSM_{sc/mc}$ enthaltene stoffspezifische Menge in Gramm

SSF-Wert → bezieht sich immer auf die stoffspezifische Einbringungsstufe (blau hinterlegtes Zellensegment der entsprechenden Zeile).

hochgestellte Indizes der Form: [a] → Besonderheit, die im nachstehen Text näher erläutert wird.

Die in der Tabelle 4-28 mit hochgestellten Indizes gekennzeichneten Zellen signalisieren stoffspezifische Besonderheiten. Im Einzelnen mit folgendem Hintergrund:

- Index [a]: Zur p-Dotierung der monokristallinen und multikristallinen Ingots wird während des CZ- oder des Kokillengussverfahrens bereits Bor hinzugegeben. Wie in den Formeln 4-4 bis 4-6 (Kapitel 4.5.2.3.3 auf Seite 240) dargestellt, werden zur p-Dotierung eines Kilogramms eines monokristallinen SGS-Ingots 0,412 mg Bor benötigt. Da Bor vor dem Schmelzprozess zugegeben wird, liegt der später kristallisierte Ingot homogen dotiert vor. Da das CZ-Verfahren nicht verlustfrei arbeitet (Reste im Quarztiegel und nicht verwendbarer Kristallhals), liegt folglich sowohl im fertigen Ingot, als auch in den nicht verwendbaren Anteilen die gleiche Dotierung vor. Mit dem Produktionsausschuss geht sonach auch eine entsprechende Menge Bor verloren, beziehungsweise liegt im fertigen Ingot nur eine um den Verlust geminderte Gesamtmenge Bor vor. Diese unterscheidet sich von der eingesetzten Menge durch den entsprechenden EPM_2. Demzufolge entspricht der *SSF* für Bor bezogen auf die Produktion monokristalliner SGS-Ingots dem diesbezüglichen EPM_2 mit 1,07. Analog gilt dies für die Produktion multikristalliner SGS-Ingots nach dem Kokillengussverfahren. Der entsprechende *SSF* für Bor gleicht dem EPM_2 für multikristallines SGS mit 1,14. Da sowohl monokristalline als auch multikristalline Solarzellen eine p-dotierte Basis benötigen, muss die tatsächlich in einem monokristallinen oder multikristallinen SGS-Ingot enthaltene Menge Bor folglich von der jeweiligen Kristallqualität unabhängig sein. Sie berechnet sich getrennt über die zugewiesenen *SSF*s zu einheitlich 0,385 mg Bor je Kilogramm Ingot.

  Weiter sind die in der Tabelle 4-28 für Bor aufgeführten kumulierten Werte der nachfolgenden Einbringungsstufen in Klammern gesetzt, da sie zwar physisch in der angegeben Menge im stufeninternen ausgewiesenen Produkt vorliegen, jedoch im $SGS_{sc/mc}$ auf atomarer Ebene fest gebunden. Demnach sind sie auf der jeweiligen Stufe eigentlich in der angegebenen kumulierten Menge $SGS_{sc/mc}$ bereits enthalten, der Übersichtlichkeit und getrennten Betrachtung halber aber additional separat mit aufgeführt. Da sich deren Gesamtgehalt im µg-Bereich bewegt, erfolgte zudem auch keine explizite Subtraktion von der eigentlichen und um die entsprechende Menge Bor zu mindernden $SGS_{sc/mc}$-Quantität.
- Index [b]: Je $gSSM_{sc/mc}$ sind per Definition (vgl. Kapitel 4.5.5: „Fertigung Standardsolarmodul“) 3 Bypass verbaut. Laut [Diodes 2014] wiegt eine, für die

Verwendung in Solarmodulen charakteristische, Bypassdiode rund 0,199 g. Die Übernahme der in Tabelle 4-25 angegebenen Einheit Stück wäre an dieser Stelle nicht zielführend, weshalb eine Umrechnung über das Stückgewicht erfolgte.

- Index [c]: Ähnlich der Erläuterungen zum Index [a] liegt auch Phosphor im $SGS_{sc/mc}$ atomar fest gebunden vor. Über Diffusionsprozesse wird er während der Solarzellenproduktion in eine dünne Schicht des Wafers eingebracht. Dort dient er der Bildung des n^+-dotierten Emitters. Wie im entsprechenden Kapitel 4.5.4.1 bereits beschrieben, kann im optimalen Fall von einer 250 nm dicken homogenen n^+-dotierten Schicht je Solarzelle ausgegangen werden. Bezogen auf ein Kilogramm $SGS_{sc/mc}$ würde im Vergleich zum Bor (p-Dotierung) so eine um den Faktor 100 höhere Phosphormenge vorliegen. Entsprechend der Schichtdicke kann nach den Formeln 4-4 bis 4-6 (Kapitel 4.5.2.3.3 auf Seite 240) indes aber von einem maximalen Phosphorgehalt je Solarzelle im hundertstelligen ng-Bereich ausgegangen werden. Ferner bewegt sich sonach die gesamte Phosphormenge je $gSSM_{sc/mc}$ (kIM_5) im unteren zweistelligen µg-Intervall und wird deshalb vernachlässigt.
- Index [d]: Der $SGS_{sc/mc}$-Gehalt eines Wafers wurde nach den physikalischen Gegebenheiten mittels Formel 4-7 (Kapitel 4.5.3.2, Seite 250) direkt berechnet. Die Grundannahme, dass ein kristalliner Wafer nur aus $SGS_{sc/mc}$ besteht, bildet daher die Basis der Berechnung. Der abrasive Materialverlust geht somit per Definition nicht in die Gesamtmenge mit ein.
- Index [e]: Als zentraler Bestandteil einer Standardsiliziumsolarzelle wird Siliziumnitrid während deren Produktion auf die später lichtzugewandte Zellenoberfläche mittels PECVD aufgebracht (vgl. Kap.: 4.5.4.1). Dafür werden die beiden, in Tabelle 4-25 als Repetierfaktoren aufgeführten, benötigten Produktionsinputs Monosilan und Ammoniak durch ein elektrisches Feld angeregt und als Siliziumnitrid flächig abgeschieden. Es erfolgt demnach eine chemische Umwandlung der Inputfaktoren, weshalb beide nicht direkt im $gSSM_{sc/mc}$ vorhanden sind. Die Menge des auf einer Solarzelle abgeschiedenen Reaktionsproduktes Siliziumnitrid wurde über dessen Dichte und der optimalen Schichtdicke von 74 nm (vgl. Abbildung 2-30, Kap. 2.5.1: „Antireflexionsbeschichtungen“, Seite 74) berechnet. Weiter ist ob der verfahrenstechnisch bedingten chemischen Umwandlung kein *SSF* für Siliziumnitrid definierbar.

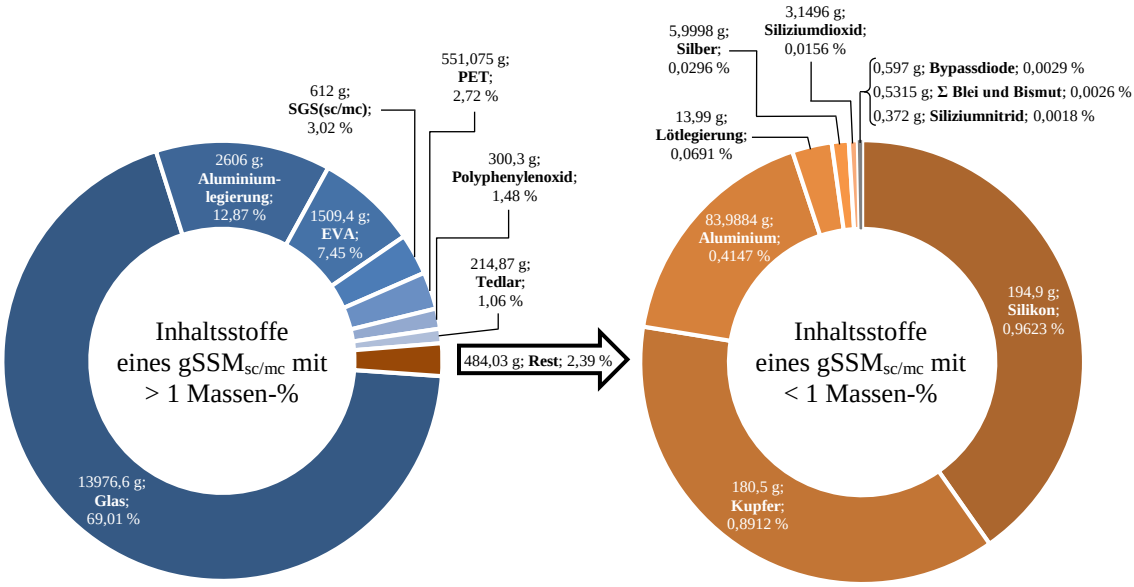
In der Tabelle 4-28 aufgeführte Erzeugnishaupt- und Erzeugnisnebenstoffe, deren *SSF*s mit dem Wert 1 gekennzeichneten sind, gehen aus der entsprechenden Produktionsstufe verlustfrei in das jeweils ausgewiesene Produkt ein. Sie können demzufolge stufenintern direkt aus dem zugehörigen Kapitel oder der Tabelle 4-25 übernommen werden (nur für die blau hinterlegten Zellensegmente betreffender Ingredienzien gültig). Etwaige Abweichung der relevanten Werte zwischen der Tabelle 4-25 und Tabelle 4-28 sowie Differenzen der in Tabelle 4-28 berechneten kumulierten Werte sind rundungsbedingt. Durch die Deckungsgleichheit der *EIMs* und der *kIM*s für beide Kristallqualitäten zeigt sich im Unterschied zum Gesamtproduktionsbedarf keine Abweichung der einzelnen Ingredienzien in Art und Quantität für monokristalline und multikristalline Standard-solarmodule, weshalb bei der inhaltsstoffbezogenen Betrachtung keine duale Diskussion mehr notwendig ist.

Der zweite Abschnitt der Tabelle 4-28 zeigt die Anteile aller Erzeugnishaupt- und Erzeugnisnebenstoffe eines $gSSM_{sc/mc}$ nach verschiedenen Kriterien. Zum einen sind die absoluten Quantitäten der Ingredienzien nach deren Masse in Gramm (orange hinterlegte Zellensegmente) angegeben, zum anderen sind die sich daraus ergebenden prozentualen Massenanteile und der stoffspezifischer Beitrag je W_p in Gramm jedweden Inhaltsstoffes aufgeführt. Ob der Ausprägung des EIM_6 entsprechen die absoluten stoffspezifischen Quantitäten den kumulierten Werten der Einbringungsstufe $Modul_{sc/mc}$ für gleiche Tabellenzeilen; korrigiert auf die Bezugseinheit Gramm. Zentrale Aussage der Tabelle 4-28 ist die Angabe der stofflichen Zusammensetzung eines $gSSM_{sc/mc}$ nach Art und Quantität aller Inhaltsstoffe. Wenngleich die beiden rechten Tabellenspalten (prozentualer Massenanteil und stoffspezifische Zusammensetzung in Gramm je W_p) gemeinsam auf den orange hinterlegten Zellensegmenten basieren, verfolgen sie unterschiedliche Ziele. Die prozentualen Angaben sollen sowohl die stoffspezifischen Massenanteile in einem $gSSM_{sc/mc}$ greifbar machen als auch einen Vergleich der berechneten Werte mit Angaben aus der Literatur (vgl. Kap.: 4.5.1) ermöglichen. Die Umrechnung auf die Einheit Gramm je W_p stellt dahingegen eine Verknüpfung zu subsekutiven Kapiteln her. In Verbindung mit den Angaben aus dem Kapitel 4.2.4 können so beispielsweise regionale Stoffströme aus Altmodulen separat betrachtet / berechnet werden.

Die Summe aller absoluten, auf die Einheit Gramm bezogenen, stoffspezifischen Anteile ergibt das Gesamtgewicht des definierten und nach dem vorgegebenen Fertigungsschema produzierten $gSSM_{sc/mc}$. Ein Vergleich des Gesamtgewichts (circa 20,25 kg) mit

handelsüblichen Solarmodulen der gleichen Spezifikation (durchschnittlich rund 20 kg Gesamtgewicht) [ENF Ltd. 2014] bestätigt die Stimmigkeit der berechneten Daten. Dies kann darüber hinaus durch eine Gegenüberstellung der Angaben aus der Literatur und der berechneten prozentualen Werte untermauert werden. Die Vergleichsgrundlage der Diskussion sollen die bereits in Tabelle 4-11 im Kapitel 4.5.1.2 auf Seite 213 gesondert (orange) gekennzeichneten und andiskutierten Daten von [Sander *et al.* 07] bilden. Vorab fasst die nachstehende Abbildung 4-50 jedoch nochmals die berechneten stoffspezifischen Massenanteile aus der Tabelle 4-28 übersichtlich zusammen.

Stoffspezifische Massenanteile in einem gSSM$_{sc/mc}$



Legende:

Beschriftung Kreisdiagrammsegmente sind stoffspezifische Angaben der Form:
[absoluter Anteil in einem gSSM$_{sc/mc}$ in Gramm; **Ingredienz**; prozentualer Anteil in Massen-%**]**

Abbildung 4-50: Stoffspezifische Massenanteile in einem gSSM$_{sc/mc}$ unterteilt in Inhaltsstoffe mit einem Anteil von mehr als 1 Massen-% und von weniger als 1 Massen-%. Daten basieren auf der Tabelle 4-28.

Die Abbildung 4-50 tut dar, dass das Frontglas mit absolut rund 13.976,6 g (entsprechen 69,01 Massen-%) den größten massenbezogenen Anteil in einem gSSM$_{sc/mc}$ stellt, gefolgt vom Modulrahmen in Form der Aluminiumlegierung (2.606 g absolut → 12,87 Massen-%) und der EVA-Folie (1.509,4 g → 7,45 Massen-%). Daran schließt sich SGS$_{sc/mc}$ als Halbleitermaterial (612 g → 3,02 Massen-%) und in Anlehnung an die literaturbezogene Datenaufbereitung der Rückseitenfolienverbund aus PET und Tedlar (∑ ~ 765,9 g → 3,78 Massen-%) an. Die als Rest zusammengefassten Ingredienzien, Inhaltsstoffe mit jeweils weniger als einem Massenprozent, sind zusätzlich in einem gesonderten Ringdiagramm aufgeführt. Die grafische Aufbereitung veranschaulicht, dass

in dieser Gruppe Silikon, Kupfer und Aluminium den Hauptbestandteil bilden. Der enorme Glasanteil ist die Folge der Verknüpfung mehrerer stoffspezifischer und fertigungstechnisch bedingter Merkmale. Zum einen liegt das Frontglas vollflächig verbaut vor. Zum anderen besitzt es, im Vergleich zu allen anderen Ingredienzien, die mit Abstand größte Schichtdicke bei zusätzlich einer der höchsten Dichten (2,5 g/cm³). Werden nun die prozentualen Angaben für den Glasgehalt eines $gSSM_{sc/mc}$ mit den Ausführungen von [Sander *et al.* 07] verglichen, zeigt sich zwar auf den ersten Blick eine geringe Abweichung, diese resultiert jedoch aus unterschiedlichen Bezugsquantitäten. Wenngleich [Sander *et al.* 07] den prozentualen Glasanteil mit 74,16 % aufführt, kann dies als obere Schranke angesehen werden. So wird weiter die folgende einschränkende Aussage getroffen: „Je nach Modulgröße werden je nach statischen Anforderungen 3 oder 4 mm dicke Glasscheiben verbaut, was zu relativen Glasanteilen zwischen 65 und 75 % führt.“ [Sander *et al.* 07, Seite 35]. Es zeigt sich also, dass eine Glasstärke von knapp 4 mm zugrunde gelegt wurde. Durch die Verwendung einer Glasstärke von 3,5 mm muss folglich der prozentuale Glasanteil sinken. Sonach liegt der eigens errechnete Wert von 69,01 Massen-% mittig des von [Sander *et al.* 07] angegeben Intervalls und würde bei gleichen Bezugsstärken nur in einem vernachlässigbar kleinen Bereich abweichen. Infolge dieser Einschränkung und der im Kapitel 4.5.1 bereits diskutierten Abhängigkeiten können die weiteren massenbezogenen Hauptbestandteile (Aluminiumrahmen, EVA, Rückseitenfolienverbund und Halbleitermaterial) ebenfalls im Rahmen vernachlässigbar kleiner Abweichungen als paritätisch betrachtet werden. Dies zeitigt neben dem Vergleich aller anderen Attribute (Abmaß, Gewicht, Standardleistung, Wirkungsgrad et cetera) des definierten $gSSM_{sc/mc}$ mit kommerziell vertriebenen kristallinen Standardsolarmodulen die Stringenz der eigens berechneten stoffspezifischen Anteile in einem $gSSM_{sc/mc}$ sowie deren Berechtigung zur weiteren Verwendung.

4.5.6.2 Weitere Beziehungen zwischen der Produktion und der stofflichen Zusammensetzung eines Standardsolarmoduls

Mittels der eingeführten Multiplikatoren (*EPM*, *kPM*, *EIM* und *kIM*) und des *SSF*s können weitere Zusammenhänge zwischen den benötigten Produktionsinputs und den tatsächlich in einem $gSSM_{sc/mc}$ enthaltenen Ingredienzien verdeutlicht werden. Einerseits kann von den Inhaltsstoffen direkt auf den notwendigen stoffspezifischen Gesamtbedarf zur Fertigung einer Einheit eines $gSSM_{sc/mc}$ nach folgender Beziehung geschlossen werden (nur für die Erzeugnishaupt- und Erzeugnisnebenstoffe gültig):

$$stoffspezifischer\ Gesamtbedarf\ zur\ Produktion = stoffspezifischer\ absoluter\ Anteil * \frac{kPM_f}{kIM_f} * SSF \qquad \textbf{Formel 4-11}$$

Die in der Formel aufgeführten kumulativen Multiplikatoren beziehen sich wie der *SSF* auf die jeweilige Einbringungs- beziehungsweise Fertigungsstufe, weshalb die Indizes die gleiche Ausprägung besitzen müssen. Beispielshalber liegt Aluminium mit rund 83,9884 g in einem $gSSM_{sc/mc}$ vor. Die beiden kumulierten Multiplikatoren entsprechen jeweils ihren Ausprägungen für den Stufenindikator fünf und der *SSF* beträgt laut Tabelle 4-28 eins. Nach Formel 4-11 ergibt sich daraus ein Gesamtbedarf für Aluminium zur Produktion eines $gSSM_{sc/mc}$ von 86,5335 g (vgl. Tabelle 4-25, Seite 281).

Andererseits lassen sich durch die Umkehrung dieser Beziehung neben der bereits im unmittelbar vorangegangenem Unterkapitel verwendeten direkten Berechnung der stoffspezifischen absoluten Anteile aus den stoffspezifischen Produktionsgesamtbedarfen stufenspezifische und stoffbezogene Produktionsverluste ermitteln. Dafür muss eine Separation der Betrachtung in zwei Ebenen erfolgen: eine stufenspezifische und eine stoffspezifische Ebene.

Auf der stoffspezifischen Betrachtungsebene liefert die Umstellung der Formel 4-11 nach dem stoffspezifischen absoluten Anteil folgende Beziehung:

$$stoffspezifischer\ absoluter\ Anteil = stoffspezifischer\ Gesamtbedarf\ zur\ Produktion * \frac{kIM_f}{kPM_f} * \frac{1}{SSF} \qquad \textbf{Formel 4-12}$$

Neben der Möglichkeit der direkten Berechnung des jeweiligen stoffspezifischen absoluten Anteile in einem $gSSM_{sc/mc}$ aus dem zugehörigen Gesamtbedarf zur Produktion (orange hinterlegte Zellensegmente der Tabelle 4-25 der entsprechenden Stoffe) lässt sich, durch eine von den mengenabhängigen Werten losgelöste Diskussion der Formel 4-12, ein weiterer stoffspezifischer Faktor definieren: die Materialeffizienz (nachstehend mit *ME* abgekürzt).

Im vorliegenden Fall dokumentiert dieser Wert welcher Anteil des in der Produktion eingesetzten Materials tatsächlich in ein $gSSM_{sc/mc}$ eingeht / in einem $gSSM_{sc/mc}$ physisch vorliegt. Wie bereits dargelegt, berechnet sich die *ME* (in Prozent) stoffabhängig nach folgender Beziehung:

$$ME\ [\%] = \frac{stoffspezifischer\ absoluter\ Anteil}{stoffspezifischer\ Gesamtbedarf\ zur\ Produktion} * 100\ \% \qquad \textbf{Formel 4-13}$$

oder

$$ME\ [\%] = \frac{kIM_f}{kPM_f} * \frac{1}{SSF} * 100\ \% \qquad \textbf{Formel 4-14}$$

Darauf aufbauend kann dann der stoffspezifische Materialverlust (nachstehend mit *MV* abgekürzt) ermittelt werden. Dieser gibt an, wieviel Prozent des eingesetzten Erzeugnishaupt- oder Erzeugnisnebenstoffes insgesamt während der kompletten Fertigungssequenz eines $gSSM_{sc/mc}$ verloren gehen. Der *MV* in Prozent ergibt sich aus:

$$MV\ [\%] = 100\ \% - ME\ [\%] \qquad \textbf{Formel 4-15}$$

Beide prozentualen Werte inklusive der Ausprägung aller für ihre Berechnung notwendigen Variablen sind in der Tabelle 4-29 übersichtlich zusammengefasst. Die Tabelle findet sich unmittelbar nach der bereits angekündigten und sich nun anschließenden Diskussion der stufenspezifischen Betrachtungsebene.

Durch die Entfernung der stoffbezogenen Komponente aus Formel 4-14 lässt sich eine allgemeine Aussage zur Effizienz der Fertigungsstufen bezogen auf das Endprodukt formulieren. Es wird folglich eine stufenspezifische obere Schranke definiert, die den maximalen Anteil jedweden, auf der fixierten Fertigungsstufe benötigten Repetierfaktors im $gSSM_{sc/mc}$ angibt. Sonach handelt es sich um die maximal erreichbare *ME* auf jeder separaten Fertigungsstufe bezüglich des Endprodukts. Diese Schranke wird im Folgenden als Stufeneffizienz (nachstehend mit *SE* abgekürzt) bezeichnet und in Abhängigkeit der

zu beschreibenden Fertigungsstufe mit dem entsprechenden Stufenindikator versehen. Durch den stetigen Bezug der *SE* einer jeden Stufe auf das Endprodukt muss sich dessen Ausprägung mit sinkenden f ebenfalls verringern, beziehungsweise maximal der Ausprägung der in der Fertigungssequenz direkt nachfolgenden Stufe entsprechen. Zum Zwecke der Vergleichbarkeit wird diese Schranke ebenfalls in Prozent berechnet und ergibt sich wie folgt:

$$SE_f\ [\%] = \frac{kIM_f}{kPM_f} * 100\ \% \qquad \textbf{Formel 4-16}$$

Analog der stoffspezifischen Betrachtungsebene kann durch die Subtraktion der SE_f von 100% der für jede Stufe charakteristische Verlust ermittelt werden: der Stufenverlust (nachstehend mit *SV* abgekürzt und mit dem entsprechend geltenden Stufenindikator versehen). Dieser Wert kennzeichnet den minimal erreichbaren stoffspezifischen Materialverlust je Fertigungsstufe bei einer Gesamtbetrachtung der Produktion. Demnach ist er als untere Schranke anzusehen, da jeder auf der betrachteten Fertigungsstufe benötigte Repetierfaktor auch bei einem *SSF* von eins mindestens diesen Verlust aufweisen muss. Dies gilt stufenintern nicht nur für alle in Tabelle 4-25 aufgeführten Repetierfaktoren, sondern darüber hinaus für mögliche neue Repetierfaktoren auf derselben Stufe im Zuge von beispielsweise Materialsubstitutionen. Der SV_f ist sonach ein für jede Fertigungsstufe separat geltender Wert. Seine Ausprägung muss per Definition für kleiner werdende f steigen; mindestens jedoch gleich seinem direkten Vorgänger sein. Die Berechnung erfolgt analog der Berechnung des *MV* mittels nachstehender Formel:

$$SV_f\ [\%] = 100\ \% - SE_f\ [\%] \qquad \textbf{Formel 4-17}$$

Die für die jeweilige Stufe charakteristischen Werte finden sich wie ihre stoffbezogenen Pendants in der Tabelle 4-29. Diese zeigt die beiden Betrachtungsebenen separat. Die stoffbezogenen Angaben (*ME* und *MV*) sind zeilenweise ihren Erzeugnishaupt- und Erzeugnisnebenstoffen zugeordnet und im rechten Teil der Tabelle, in den blau hinterlegten Zellen, aufgeführt. Die stufenspezifischen Angaben (SE_f und SV_f) befinden sich am unteren Ende in den orange hinterlegten Zellen der zum jeweils gültigen Stufenindikator gehörigen Tabellenspalte.

Tabelle 4-29: Zusammenfassende Übersicht der stoff- und stufenspezifischen Werte ME, MV, SE und SV sowie aller zu deren Berechnung benötigten Variablen für die Erzeugnishaupt- und Erzeugnisnebenstoffe sowie der relevanten Fertigungsstufen.

	Stoff- und stufenspezifische Angaben	Stufenindikator 3	4	5	6	SSF	Stoffbezogene Angaben ME [%]	MV [%]
Erzeugnishaupt- und Erzeugnisnebenstoffe	**Aluminium**			61,8182 / 60		1	97,06	2,94
	Aluminiumlegierung				1,0101 / 1	1	99	1
	Bor	1,19315 / 0,612				sc: 1,07 mc: 1,14	sc: 47,98 mc: 44,99	sc: 52,02 mc: 55,01
	Bypassdiode				1,0101 / 1	1	99	1
	Ethylenvinylacetat (EVA)				1,0101 / 1	1,06	93,4	6,6
	Glas				1,0101 / 1	1/0,99	98,01	1,99
	Kupfer				1,0101 / 1	1	99	1
	Lötlegierung				1,0101 / 1	1	99	1
	Phosphor (n^+-Dotierung)			61,8182 / 60		-[a]	≤ 97,06	≥ 2,94
	Polyethylenterephthalat				1,0101 / 1	1,06	93,4	6,6
	Polyphenylenoxid				1,0101 / 1	1	99	1
	Polyvinylfluorid (Tedlar)				1,0101 / 1	1,06	93,4	6,6
	$SGS_{sc/mc}$		65,775 / 60			1,7784	51,29	48,71
	Silber			61,8182 / 60		1	97,06	2,94
	Silikon				1,0101 / 1	1	99	1
	Siliziumdioxid			61,8182 / 60		1	97,06	2,94
	Siliziumnitrid			61,8182 / 60		-[a]	≤ 97,06	≥ 2,94
	Σ Blei und Bismut			61,8182 / 60		1	97,06	2,94

Stufenbezogene Angaben		3	4	5	6
	SE [%]	51,29	91,22	97,06	99
	SV [%]	48,71	8,78	2,94	1

Legende:

65,775 / 60 → kPM / kIM der entsprechenden stoffbezogenen Einbringungsstufe.

SSF-Wert → Bezieht sich immer auf die stoffspezifische Einbringungsstufe.

Index [a] → Wert nicht ermittelbar; Begründung siehe Tabelle 4-28 inklusive der zugehörigen Erläuterungen (Seite 290ff).

Wie bereits andiskutiert, zeitigen die *ME*s und *MV*s für Ingredienzien mit einem *SSF* von Eins die gleichen Ausprägungen wie die der jeweiligen Einbringungsstufe zuzuordnenden *SE*s und *SV*s. Aus der rechten Tabellenspalte ist der über die gesamte Produktion eines $gSSM_{sc/mc}$ auftretende Verlust eines jeden Ingredienz direkt abzulesen. So geht beispielshalber 2,94 % des gesamt eingesetzten Silbers über alle Produktionsschritte verloren.

Die in der untersten Tabellenzeile orange hinterlegten *SV*s stellen in ihrer Ausprägung eine essentielle Erkenntnis über die Zusammenhänge der gesamten betrachteten Produktionssequenz eines $gSSM_{sc/mc}$ dar, sind sie doch stoffübergreifend in der jeweils zugehörige Fertigungsstufe global gültig. Den *SV*s folgend zeigt sich, das beispielshalber alle während der Waferfertigung in ein $gSSM_{sc/mc}$ eingehenden Stoffe einen Mindestverlust von 8,78 % aufweisen. Sonach können Materialmindestverluste in Abhängigkeit ihrer Einbringungsstufe selbst bei anstehenden Materialsubstitutionen direkt ausgewiesen werden.

Weiter ist den Angaben zu entnehmen, dass die Fertigungsstufe der $SGS_{sc/mc}$-Ingotherstellung mit 48,71 % einen vergleichsweise hohen Mindestverlust aufweist. Dieser bedingt sich durch den hohen abrasiven Materialverlust bei der Wafervereinzelung. Sonach zeigt sich an dieser Stelle ein hohes Potenzial verlustfreier Waferherstellungsverfahren wie beispielsweise dem EFG-Verfahren zur Herstellung von sogenanntem Foliensilizium. Gleichwohl können Recyclingverfahren zur Wiederverwendung von Wafern oder gar ganzen Solarzellen einen essentiellen Beitrag zur Verringerung der Materialverluste, oder gleichbedeutend zur Steigerung der Materialeffizienz, liefern.

Auffallend ist die große Differenz des *MV* von $SGS_{sc/mc}$ zu dessen stufenspezifischen Minimum (SV_4). Dies begründet sich in seinem hohen *SSF*. Darüber hinaus zeigt sich, dass die *ME* und der *MV* von $SGS_{sc/mc}$ den Werten der SE_3 und des SV_3 entsprechen; mit folgendem Hintergrund. Die *ME* und der *MV* von $SGS_{sc/mc}$ sind über den *SSF* definiert. Dieser entspricht den produktionsabhängigen Verlusten entlang der Siliziumsurrogate, woraus sich die zur Berechnung der *SV*s benötigten *kPM*s und *kIM*s ableiten.

Veränderungen im Einsatz der Siliziumsurrogate, bespielweise durch die Wiederverwendung rezyklierter Wafer oder Solarzellen, haben sonach globale Auswirkungen auf die gesamte Produktionsbilanz.

4.6 Kritische Rohstoffe

Nach der Betrachtung der einzelnen Fertigungsstufen eines $gSSM_{sc/mc}$ und der Definition der stofflichen Zusammensetzung eines nach diesem Fertigungsschema produzierten Standardsolarmoduls werden nachfolgend die produktionsrelevanten Rohstoffe kritisch hinsichtlich etwaiger Umwelteffekte, Gesundheitsgefährdungspotenziale sowie ihrer Verfügbarkeit einhergehend mit möglichen Importabhängigkeiten analysiert.

4.6.1 Umwelteffekte und Gesundheitsgefährdungspotenziale

In der Ebene der Umwelteffekte und Gesundheitsgefährdungspotenziale kann zwischen drei Kategorien unterschieden werden:

- Effekte ausgehend von der Produktion eines Standardsolarmoduls,
- Emissionen während des Betriebs einer Photovoltaikanlage und
- Auswirkungen durch mögliche Recyclingaktivitäten am Betriebsende.

Wenngleich im Normalbetrieb einer Photovoltaikanlage[102] keine Emissionen von Schall und Schwingungen sowie Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen auftreten [Kaltschmitt und Streicher 2012a, S. 268f]; [Goetzberger und Hoffmann 2010, S. 137f]; [Mertens 2011, S. 138ff]; [Fthenakis 2012, S. 1083f und S.1093], in toto sich keine Stofffreisetzungen jeglicher Art gebaren, können teilweise geringe Emissionen niederfrequenter magnetischer Felder [Kaltschmitt und Streicher 2012a, S. 269] sowie geringfügige punktuelle Wärmeemissionen[103] entstehen.

Emissionen, die während möglicher Recyclingaktivitäten am Betriebsende durch die Ingredienzien eines $gSSM_{sc/mc}$ selbst und durch mögliche Prozessadditive auftreten können, sind vom jeweils zugrunde liegenden Recyclingprozess abhängig. Aufgrund dessen wird an dieser Stelle auf die entsprechenden Kapitel zu den einzelnen Recyclingtechnologien verwiesen (Kapitel 5.3.1 bis 5.3.8). Werden die Solarmodule indes keinem stofflichen Recyclingprozess unterzogen, sondern einer Verbrennungsanlage zugeführt, können bei einer nicht sachgemäßen oder fehlerbehafteten Rauchgasreinigung Umweltbelastungen

[102] Einige Wechselrichter generieren geringfügige Geräuschemissionen.

[103] Entgegen der gemein gültigen Darstellung vieler Autoren handelt es sich beim Betrieb einer Solaranlage ob der Wärmeentwicklung rein objektiv betrachtet nicht um einen Nullemissionsprozess.

durch das Freisetzen wie etwa der enthaltenen Schwermetalle entstehen. Gleichwohl, sollten die Solarmodule deponiert werden, können erhöhte Schwermetallgehalte in den Eluatwerten schädliche Umwelteffekte nach sich ziehen. [Fthenakis 2012, S. 1094f]

Dem gegenüber stehen Umwelt- und Gesundheitsgefährdungspotenziale infolge der Produktion eines Standardsolarmoduls durch den produktionsbedingten Einsatz verschiedenster Chemikalien und Rohstoffe wie beispielshalber von Schwermetallen. Während aus Verätzungen und der Inhalation von Chemikaliendämpfen (Salpetersäure, Natriumhydroxid, Phosphoroxychlorid) berufsbedingte Gesundheitsgefährdungen resultieren können, sind bis heute keine Gesundheitsbeeinträchtigungen der Öffentlichkeit im Zuge der Produktionsprozesse bekannt. Mögliche Quellen finden sich jedoch entlang der gesamten Produktionssequenz durch die Entstehung von festen und flüssigen Rückständen aus der Waferfertigung, Reinigungsschritten, Ätzprozessen et cetera, sowie durch die Verwendung bleihaltiger Lötlegierungen.

Tabelle 4-30 auf der nachfolgenden Seite zeigt zusammengefasst alle verwendeten Repetierfaktoren, die nach der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008[104] kennzeichnungspflichtig sind, samt der zugehörigen GHS-Piktogramme, exklusive der damit einhergehenden H- und P-Sätze. Die zugehörigen Gefahren- und Sicherheitshinweise können der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 in den zugehörigen Anhängen 3 und 4 auf den Seiten 146 bis 324 entnommen werden. Wie aus Tabelle 4-30 zu ersehen ist, geht das Gros der Gefahren durch den Einsatz der Repetierfaktoren auf deren leicht- beziehungsweise hochentzündliches Verhalten sowie auf deren ätzende Wirkung zurück, wobei von keiner der genutzten Substanzen eine Explosionsgefahr rührt. Als umwelt- oder/und gesundheitsgefährdend sind Ammoniak, Blei, Kupfer, Phosphoroxychlorid und Tetrafluorethylen eingestuft. Darüber hinaus geht auch von Fluorwasserstoff ob dessen toxischer Wirkung ein Gesundheitsgefährdungspotenzial aus. Zurzeit sind jedoch keinerlei beispielhafte Umwelt- und Gesundheitsgefährdungen durch die Produktionsprozesse bekannt geworden. Alle Produktionsprozesse sind streng kontrolliert und gleichen in ihren Umweltschutzvorgaben weitestgehend denen der Halbleiterindustrie. Vielmehr stehen die während der Produktionssequenz anfallenden flüssigen und festen Abfälle im Mittelpunkt der Diskussionen. Dies betrifft besonders den Anfall des mit der

[104] Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006.

Trägerflüssigkeit (PEG) stark verunreinigten abrasiven Materialverlustes während der Wafervereinzelung sowie die genutzten Reinigungs- und Ätzflüssigkeiten. [Kaltschmitt und Streicher 2012a, S. 268]; [Goetzberger und Hoffmann 2010, S. 137]

Tabelle 4-30: Alle nach Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 kennzeichnungspflichtigen Repetierfaktoren zur Herstellung eines $gSSM_{sc/mc}$ mit den zugehörigen GHS-Piktogrammen.

	Kennzeichnungspflichtige Repetierfaktoren	**GHS-Piktogramm**								
										
Repetierfaktoren	**Aceton$_{fl}$**		X					X		
	Ammoniak$_{fl}$					X	X			X
	Bismut		X							
	Blei							X	X	X
	Essigsäure (98 %ig)		X			X				
	Ethanol		X							
	Fluorwasserstoff					X	X			
	Helium$_{g}$				X					
	Isopropanol		X					X		
	Kupfer		X							X
	Monosilan		X		X					
	Natriumhydroxid					X				
	Natronlauge (50 %ig)					X				
	PEG (TEG)							X		
	Phosphoroxychlorid					X	X		X	
	Salpetersäure (50 %ig)			X		X				
	Salzsäure (30 %ig)					X		X		
	Sauerstoff$_{fl}$			X						
	Siliziumcarbid							X		
	Tetrafluorethylen		X		X				X	
	Wasserstoff$_{fl}$		X							

Legende:

GHS-Piktogramm									
Kennbuchstabe (EU)	E	F / F+	O		C	T / T+	Xi	Xn	N
Europäische Gefahrenbezeichnung	Explo-sions-gefährlich	Leicht-/Hochent-zündlich	Brand-fördernd	(Gase unter Druck)	Ätzend	(sehr) giftig	Reizend	Gesund-heits-schädlich	Umwelt-gefährlich

Eine gesonderte Rolle bei der Diskussion um mögliche produktionsbedingte Umwelt- und Gesundheitsgefährdungen nimmt die Verwendung bleihaltiger Lötlegierungen ein. Der Bleigehalt der Lötlegierung zur elektrischen Verbindung einzelner Solarzellen beträgt rund 40 % (Legierungsbezeichnung: Sn60Pb40). Während des Lötprozesses können daraus Bleidämpfe entweichen, weshalb die Abluft fachgerecht zu behandeln ist. Weiter

gehen Gefahren von dem produktionsbedingten Bleigehalt in einem $gSSM_{sc/mc}$ an dessen Betriebsende ob des nicht geklärten Entsorgungsweges aus. Blei und bleihaltige Verbindungen werden zu den Umweltgiften gezählt. Sie zeigen ein bioakkumulatives Verhalten und reichern sich im Körper an, indem Blei beispielshalber in den Knochen eingelagert wird. Selbst bei der Aufnahme geringer Mengen über einen langen Zeitraum kann es sonach zu chronischen Vergiftungserscheinungen wie Nierenschäden oder Muskelschwäche kommen. Die Verwendung von bleihaltigen Lötlegierungen ist zwar Gegenstand der EU Richtlinie 2011/65/EU (RoHS 2), welche mit der Verordnung zur Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (ElektroStoffV) vom 19.04.2013 in deutsches Recht umgesetzt wurde, unterliegt aber im Falle der Photovoltaik keiner Verwendungseinschränkung. Grund dafür ist die Präklusion von Photovoltaikmodulen nach Artikel 2, Abs. 4, Buchstabe i der nach EU Richtlinie 2011/65/EU, beziehungsweise Artikel 1, Abs. 2, Nummer 9 der ElektroStoffV. Erfreulicherweise setzten dennoch einzelne Unternehmen verstärkt auf bleifreie Lötlegierungen, trotz daraus resultierenden Nachteilen in der Moduleffizienz, der Langzeitstabilität der Lötstellen und meist höheren Produktionskosten ob teureren Substituten und höher benötigten Prozesstemperaturen. Nähere Informationen zu den eingesetzten Substituten finden sich im Kapitel 5.5. Mögliche Treibhauspotenziale und Ozonabbaupotenzial sämtlicher Repetierfaktoren sind in Tabelle 4-30 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht mit enthalten, da keine der verwendeten Substanzen ein Ozonabbaupotenzial ausweist und sich das Treibhauspotenzial auf eine einzelne Stoffgruppe zurückführen lässt; die fluorierten Gasquellen wie Tetrafluormethan (CF_4) und Schwefelhexafluorid (SF_6), welche zusammengefasst als Tetrafluorethylen zum Plasmaätzen während der Produktion kristalliner Siliziumsolarzellen verwendet werden. Beide Substanzen besitzen ein vergleichsweise hohes Treibhauspotenzial (CF_4: 6.630 CO_2-Äquivalente bezogen auf 100 Jahre und einer Verweilzeit von 50.000 Jahren, SF_6: 23.500 CO_2-Äquivalente bezogen auf 100 Jahre und einer Verweilzeit von 3.200 Jahren) [Myhre 2013, S. 91]. Allerdings findet deren Anwendung in einem Batchprozess unter kontrollierten Bedingungen statt. In den nachgeschalteten Minderungssystemen wird der in der Batchkammer nicht reagierte klimawirksame Gasanteil thermisch zersetzt. Unter der Annahme, dass die Reinigungssysteme einwandfrei funktionieren und den rechtlichen Anforderungen genügen, kann trotz der hohen Treibhauspotenziale nur von einem infinitesimalen direkten Beitrag zum Treibhauseffekt ausgegangen werden.

4.6.2 Verfügbarkeit und Importabhängigkeit

Neben der Betrachtung der Repetierfaktoren bezüglich ihrer Umwelt- und Gesundheitsgefährdungspotenziale sind ebenjene auch kritisch hinsichtlich ihrer geologischen und, durch etwaige Importabhängigkeiten, ökonomischen Verfügbarkeiten zu analysieren. Vom rein geologischen Standpunkt sind laut [BMWi 2010, Seite 6] mit Ausnahme des Rohstoffes Erdöl „[…] weltweit keine physischen Verknappungen zu befürchten." Zeitweilige Engpässe bei der Versorgung mit mineralischen Rohstoffen bestünden lediglich bei zu geringen Explorationsraten; Kapazitätsengpässen bei der Gewinnung, dem Transport oder der Verarbeitung; sowie durch politische Markteingriffe und Spekulationen [BWMi 2010]. Dabei lassen sich die Engpässe idealtypisch in zwei Klassen aufteilen: temporäre und strukturelle Versorgungsengpässe.

Wenngleich temporäre Versorgungsengpässe als zeitweise Angebotsverknappung ob kurzfristigem Nachfrageüberhang in der deutschen Photovoltaikbranche bereits bei mehreren Repetierfaktoren und Stoffgruppen aufgetreten sind, waren sie größtenteils gleichsam in den Jahren 2006 bis 2010 zu beobachten. In diesem Zeitraum kam es in vier aufeinanderfolgenden Jahren zu den jeweils stärksten absoluten innerdeutschen Kapazitätszuwächsen (vgl. Kap. 4.2.3), wodurch die vorhandenen Produktionskapazitäten der stoffspezifischen Nachfrage nicht folgen konnten. Dies betraf besonders die Versorgung der Produktion mit Solarglas, Graphit und MGS[105]. [Behrendt *et al.* 2010, Seite 42f]

Daraufhin reagierten verschiedenste Hersteller mit einem starken Ausbau der Produktionskapazitäten. Der Zeitverzug zwischen Nachfrageanstieg und Kapazitätsausbau spiegelte sich in erster Linie im Preis wieder. Dies wird besonders am Beispiel von SGS_p deutlich. Während der Spotmarktpreis für SGS_p bis Ende 2003 rund 30 $/kg betrug, stieg er bis Ende 2005 auf knapp 100 $/kg an. In den darauf folgenden zwei Jahren explodierte der Spotmarktpreis förmlich und lag Anfang 2008 auf einem Rekordniveau von 475 $/kg. Durch den massiven Kapazitätsausbau, vor allem in den asiatischen Ländern, sank der Preis anschließend rapide auf letztlich 17 $/kg Ende 2012. [Claudy *et al.* 2010, Seite 41] Wenngleich der weltweite Polysiliziumbedarf steigt, stehen mittlerweile ausreichend Kapazitäten zur Verfügung, weshalb sich der Preis für SGS_p konstant zwischen 17 und 22 $/kg bewegt [Mertens 2011, Seite 140]; [Forstner *et al.* 2014]. Trotz

[105] Auch die in der Literatur selten erwähnte Versorgung der Produktion mit Polymerfolien zur Laminierung der Module war zeitweilig betroffen.

Einbruch des deutschen Photovoltaikmarktes können regional ansässige SGS_p-Hersteller wie beispielshalber die Wacker Chemie AG weitere Umsatzsteigerungen verzeichnen, auch ob der eingeführten Importzölle. [PV Magazin 2014]; [Wacker Chemie AG 2014] Ein ähnliches Bild liefert die Betrachtung der Produktionsversorgung mit Solarglas. Nachdem infolge des stark gewachsenen Nachfrageaufkommens ebenfalls die Produktionskapazitäten massiv ausgebaut wurden, sanken mit dem Eintreten eines Überangebotes nach 2009 die Preise von 10,40 $/m² auf 4,60 $/m² im Jahr 2014. [IHS Inc. 2014] Gleichwohl soll der Preisverfall in den kommenden Jahren durch das Greifen der Importzölle und der damit einhergehenden Begrenzung des Angebots auf dem europäischen Markt stoppen, beziehungsweise sich geringfügig invertieren. [Enkhardt 2014]

Durch den Ausbau der Produktionskapazitäten aller aufgeführten jüngsthin temporär kritischen Repetierfaktoren und dem derzeitigen niedrigen Niveau des deutschen Photovoltaikmarktes sowie der großen Anzahl internationaler Konkurrenten sind, ausgenommen eines imponderablen sprunghaften nationalen Marktwachstums, in naher Zukunft keine weiteren oder wiederkehrenden temporären Versorgungsengpässe der deutschen kristallinen Photovoltaikindustrie entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu erwarten.

Strukturelle Engpässe, beispielshalber durch die Abhängigkeit der spezifischen Rohstoffproduktion als Kuppelprodukt von den Produktionskapazitäten des zugehörigen Hauptproduktes, finden sich in der Literatur kontrovers diskutiert. Während das Gros der Autoren die Verfügbarkeit aller Repetierfaktoren für die kristalline Siliziumsolartechnologie als ungefährdet sehen[106] [Mertens 2011, Seite 140]; [BWMi 2010], wird vereinzelt auf eine Verknappung von Silber hingewiesen. [Behrendt *et al.* 2010, Seite 44ff]; [Ullrich 2014]

Gegen einen strukturellen und gleichwohl temporären Versorgungsengpass in der Photovoltaikindustrie bezüglich Silber sprechen jedoch mehrere Fakten. Einerseits konnte die verwendete Menge Silber je produzierter kristalliner Siliziumsolarzelle, wie bereits im Kapitel 4.5.4.2 auf den Seiten 268ff ausführlich diskutiert, in den letzten Jahren erheblich gesenkt werden. Darüber hinaus lassen sich, mit der Entwicklung fortschrittlicher Produktionstechnologien wie beispielshalber dem Koextrusionsdruck, abermals Ein-

[106] Mitunter wird die Versorgung der Produktion mit hochreinem Silizium als Engpass beschrieben. Dies lässt sich jedoch auf den temporären Versorgungsengpass von MGS und darauf aufbauend auf einen temporären Engpass von SGS_p zurückführen.

sparungen des verwendeten Silbers zur Produktion einer kristallinen Siliziumsolarzelle um den Faktor 5 realisieren [Neuhaus 2014]. Andererseits zeigen sich industrielle Bestrebungen zur Substitution des Silbers durch Kupfer. Weiter zeichnet sich besonders für die national ansässigen Zellenproduzenten kein Versorgungsengpass bezüglich Silber ob des gegenwärtigen europäischen und nationalen Marktverhaltens branchenintern ab.

Die langfristige Rohstoffversorgung der deutschen Industrie (branchenübergreifend) bezüglich der zur Fertigung eines $gSSM_{sc/mc}$ benötigten Repetierfaktoren findet sich in unterschiedlichen Studien indes widersprüchlich diskutiert. Neben der Verwendung verschiedener Datenquellen begründen sich die disparaten Angaben in den inhomogenen Analyseansätzen. Beispielshalber nutzt [Erdmann *et al.* 2011] als Analysekriterien für das Kritikalitätsscreening das Versorgungsrisiko und die Vulnerabilität der deutschen Wirtschaft, welche mit Hilfe verschiedenster Indikatoren rohstoffspezifisch bestimmt werden. Gleichwohl wird wie in anderen Studien die rohstoffspezifische statische Reservenreichweite mit einbezogen (vgl. beispielshalber [Angerer *et al.* 2009]). Dem entgegen schließen [Buchholz *et al.* 2014] und [Huy *et al.* 2014] die Verwendung oder Betrachtung etwaiger geologischer Verfügbarkeiten initial aus. So schreibt [Buchholz *et al.* 2014] auf Seite 29: „Aus geologischer und bergmännischer Sicht sind Metallrohstoffe und Industrieminerale auch langfristig nicht knapp.“ [Huy *et al.* 2014] fügt hinzu: „Was häufig außer Acht gelassen wird, ist die Tatsache, dass nur ein Bruchteil der bestehenden geologischen Rohstoffpotenziale überhaupt bekannt ist. Durch fortschreitende Entwicklung in der Exploration werden ständig neue Rohstoffvorkommen entdeckt“ [Huy *et al.* 2014, Seite 12]. Beide gehen vielmehr von Versorgungsengpässen durch Lieferrisiken ob wirtschaftlicher Restriktionen aus. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass jederzeit kurzfristige Engpässe durch imponderable Begebenheiten (Störfälle in Bergwerken und Raffinerien, Streiks, sowie Umwelt- und Naturkatastrophen) auftreten können [Buchholz *et al.* 2014, S.29]. Durch die Absenz der Betrachtung der geologischen Verfügbarkeit erfolgt die Einstufung der Rohstoffe in Risikogruppen mittels Indikatoren wie dem Herfindahl-Hirschman-Index (kurz: HHI) zur Ermittlung der Länder- sowie Firmenkonzentration und den Worldwide Governance Indicators (kurz: WGI) der Weltbankgruppe zur Bestimmung des gewichteten Länderrisikos.

Konkret wird bei den meisten Studien die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Zinn und Bismut als besonders kritisch eingestuft. Grund ist die hohe Konzentration der Weltproduktion auf wenige Länder und die damit einhergehende starke Importab-

hängigkeit. Im Falle von Zinn entfallen in Summe 70 % der jährlichen Bergwerksförderung zu gleichen Teilen auf China und Indonesien [Buchholz *et al.* 2014, S.76]. Weiter wird die statische Reservenreichweite auf mittlerweile weniger als 20 Jahre beziffert [Erdmann *et al.* 2011]. Seit 1994, mit der Schließung der Zinnhütte in Duisburg, wird in Deutschland kein Zinn mehr gefördert; es wird lediglich importiert. Hauptverwendungszweck sind die Produktion von Lötzinn, Indiumzinnoxid (ITO) für die Displaybeschichtung und LEDs. Durch das Verbot bleihaltiger Lötlegierungen in der EU für elektrische und elektronische Geräte ist weiterhin mit einer steigenden Zinnnachfrage zu rechnen, da bleifrei Lote einen wesentlich höheren Zinnanteil besitzen (Zinn-Silber-Kupferlote besitzen einen Zinnanteil von über 95 %). Bismut wird als besonders versorgungskritisch eingestuft, da sowohl die geologische Konzentration der globalen bekannten Reserven mit 80 % auf China und Peru entfallen [bifa Umweltinstitut 2014], als auch die globale Förderung und Raffinadeproduktion zu knapp 80 % alleinig in China stattfindet [Buchholz *et al.* 2014, S.73].

[Buchholz *et al.* 2014] bewertet die langfristige Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Blei und Graphit ebenfalls als kritisch, da für beide Rohstoffe die Bergwerksförderung stark konzentriert ist und jeweils mit über 50 % auf China entfällt.

Wenngleich ebenfalls die langfristige Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Silber studienübergreifend als kritisch eingestuft wird, erfolgt dies in unterschiedlichen Ausprägungen. Der Grund ist ebenjene bereits andiskutierte inhomogene Verwendung der statischen Reservenreichweite. Studien, die sich dieser Angabe bedienen, ordnen Silber ein hohes Versorgungsrisiko zu, da sie weniger als 13 Jahre betragen soll [Behrendt *et al.* 2010]; [Angerer *et al.* 2009]; [bifa Umweltinstitut 2014]. Durch die Absenz dieser Angabe ordnet [Buchholz *et al.* 2014] Silber indes in eine niedrige Risikogruppe ein, da die Vorkommen weltweit breit gestreut sind und keine hohe Länder- sowie Firmenkonzentration bei der Gewinnung vorliegt.[107]

Tabelle 4-31 soll im Anschluss an die Diskussion nochmals einen Überblick der mitunter nur vereinzelt aufgeführten Rohstoffe samt etwaiger studieninterner Einstufungen liefern.

[107] 25 % des vom Bergbau produzierten Silbers entstammt aus Minen mit Silber als Hauptprodukt; meist wird Silber jedoch als Nebenprodukt anderer Metallgewinnungsverfahren (Kupfer-, Gold-, Blei-/Zinkerze) gewonnen. [Angerer *et al.* 2009]

Tabelle 4-31: Zuordnung der Ausprägung des langfristigen Versorgungsrisikos der deutschen Wirtschaft (branchenübergreifend) mit für ein $gSSM_{msc/mc}$ produktionsrelevanten Rohstoffen verschiedener Studien.

Branchenüber-greifendes langfristiges Versorgungsrisiko		Quelle								
		Behrendt *et al.* 2010	**Erdmann *et al.* 2011**	**Europäische Kommission 2014**	**Buchholz *et al.* 2014**					**bifa Umweltinstitut 2014**
Repetierfaktoren	**Bismut**		hoch			Bergwerksförderung	hoch	Raffinadeproduktion		
	Blei				hoch		hoch			
	Graphit				hoch					hoch
	Kupfer		mittel		gering		gering			
	Silber	X[1]	hoch		gering					mittel
	Zinn		hoch		hoch		hoch			hoch

Index 1: Es werden lediglich mögliche strukturelle Versorgungsengpässe aufgeführt.

Bei allen in der Tabelle 4-31 aufgeführten Rohstoffen ist Deutschland stark import-abhängig[108]. [Babies *et al.* 2011]; [Erdmann *et al.* 2011] Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass zwar branchenübergreifend einigen, für die kristalline Siliziumsolar-technologie produktionsrelevanten, Rohstoffen ein langfristiges Versorgungsrisiko zugeschrieben wird, branchenintern jedoch durch die geringen benötigten Mengen dieser Rohstoffe zur Fertigung eines $gSSM_{sc/mc}$ kaum Engpässe zu erwarten sind. Dies stützen ebenfalls auf die deutsche Photovoltaikbranche speziell ausgerichtete Studien wie beispielshalber [Behrendt *et al.* 2010] und [Sander *et al.* 2007].

Die von vielen Autoren getroffene Aussage, dass der Photovoltaik zukünftig Versor-gungsrisiken mit einigen Rohstoffen, beziehungsweise deren geologische und öko-nomische Verknappung bevorstünde, ist die Folge einer fälschlichen Verallgemeinerung der einzelnen Solarzellentechnologien durch die Reduktion auf „die Photovoltaik“. Wie bereits im Kapitel 3: „Solarzellentechnologien“ ausführlich beschrieben, unterscheiden sich die einzelnen technologischen Ansätze jedoch erheblich in den verwendeten Rohstoffen, den jeweiligen Produktionsschritten sowie, abgesehen von der Notwendig-keit eines pn-Übergangs und damit der grundlegenden Funktionsweise der licht-induzierten Ladungsträgertrennung, dem Zellenaufbau. Eine technologische Unterteilung der einzelnen Zellenkonzepte ist daher obligat. Etwaige Angaben in der Literatur bezüglich knapper / kritischer Rohstoffe für die Photovoltaikbranche lassen sich, mit Ausnahme der bereits diskutierten jüngsthin temporären Engpässe in der Versorgung der

[108] Gilt nur für Erze und Konzentrate. Deutschland ist bei Metallen primärseitig schier gänzlich auf Importe angewiesen [BMU 2012, S. 71]. Die Raffinadeproduktion aus Sekundärmaterial trägt jedoch stellenweise einen großen Beitrag zur Eigenversorgung bei. Im Jahr 2013 entstammten 42 % der deutschen Kupferproduktion aus Sekundärmaterial; die nationale Raffinadebleiproduktion wies sogar einen Sekundärmaterialanteil von 62 % auf. [Huy *et al.* 2014]

Produzenten der kristallinen Siliziumsolartechnologie, auf die Dünnschichttechnologie mit den dafür benötigten Rohstoffen wie Tellur (CdTe), Indium (CIS/CIGS) und Germanium (Stapelzelle) reduzieren [Ullrich 2014]; [Mertens 2011, Seite 140ff]; [BWMi 2010].

Für weitere Informationen zu Import- und Exportstatistiken, sowie zu Angaben bezüglich Vorkommen, Produktion und nationale Verwendung der diskutierten Rohstoffe wird auf [Buchholz *et al.* 2014], [Erdmann *et al.* 2011], [Huy *et al.* 2014] und [Angerer *et al.* 2009] verweisen. Detaillierte Materialstrombilanzen für Kupfer finden sich darüber hinaus in [Wagner *et al.* 2012]. Eine leicht verständliche Einführung in die Problematik mineralischer Rohstoffe und allgemeine diesbezügliche Definitionen liefert [Haas und Schlesinger 2007].

Recycling kann in diesem Zusammenhang einen wichtigen Beitrag zur Senkung der Importabhängigkeiten leisten und so strukturellen Versorgungsengpässen entgegenwirken. Gleichwohl vermag es die natürliche Umwelt nicht nur als Ressourcenlieferant, sondern ebenfalls als Rückstandsaufnahmemedium zu entlasten. Für die Fertigung eines kristallinen Siliziumsolarmoduls ist zwar die Frage der ausreichenden und nachhaltigen Versorgung der Produktion mit Rohstoffen essentiell, es ergibt sich indes aber auch die Frage nach der sinnvollen Verwendung der entstehenden Abfälle entlang der gesamten Produktionssequenz. Abgesehen von den für ein mögliches Recycling zur Verfügung stehenden Abfallströme aus Altmodulen am Lebenszyklusende, Garantiefällen sowie Altmodulen aus Transport- und Installationsschäden, können ebenjene Produktionsabfälle einen erheblichen Anteil am verfügbaren Gesamtabfallstrom ausmachen. Diese sind jedoch örtlich mit dem Standort der Produzenten korreliert, weshalb eine Lokalisierung der verschiedenen Produktionsstufen samt der jährlichen Produktionsmengen für eine Berechnung der Quantität der spezifischen Produktionsabfallströme grundlegend ist. Dieserhalb beschäftigt sich das nachstehende Kapitel mit den regional ansässigen Produzenten entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

4.7 Übersicht Produzenten

Die Zukunft der nationalen PV-Produzenten bezogen auf die Siliziumsurrogate stellt sich als imponderabel dar. Der IST-Zustand zeigt sich besonders von den Negativentwicklungen seit 2011, wie Werksschließungen, Insolvenzen, Übernahmen und Kapazitätsabbau, geprägt. Auf der Ebene der Waferfertigung schieden 2012 zwei der national fünf ansässigen Produzenten aus dem Markt aus: die Schott Solar Wafer GmbH (Juni 2012) und die Sovello AG (Insolvenz im Mai 2012). Da beide Firmen auch auf dem Gebiet der kristallinen Siliziumsolarzellenproduktion aktiv waren, wurden sonach auch auf dieser Ebene nationale Produktionskapazitäten entzogen. Gleichwohl schied im Jahr 2013 die Solland Solar Cells GmbH aus dem Markt der Zellenproduzenten aus. Zusätzlich trug erst jüngsthin mit der Schließung der deutschen Produktionsstätten (24. Februar 2015) und deren Verlagerung nach Südkorea ein weiterer in Deutschland tätiger Produzent zum Negativtrend der deutschen Solarindustrie bei; Hanwha Q-Cells produzierte am Standort in Thalheim neben kristallinen Siliziumsolarmodulen auch die dafür benötigten Solarzellen. Alle vier bereits genannten Firmen waren im Bereich der Zellenfertigung tätig. Mit deren Ausscheiden verschwanden zwischen 2012 und 2015 die Hälfte aller nationalen Zellenproduzenten. Im Bereich der Modulfertigung wirkte sich deren modulspezifischer Kapazitätsabbau indes nicht so dramatisch aus, da die Quantität der national ansässigen Modulproduzenten um ein Vielfaches höher liegt.

Tabelle 4-32 auf der nachfolgenden Seite soll einen Überblick des IST-Zustandes der deutschen PV-Industrie entlang der Siliziumsurrogate liefern. Sie beinhaltet alle führenden Produzenten der jeweiligen Fertigungsebene inklusive der vorhandenen Produktionskapazitäten im Zeitraum 2012 bis 2014 sowie deren tatsächlichen Produktionsmengen für die Jahre 2012 und 2013; soweit verfügbar. Zusätzlich sind die bereits erwähnten, aus dem Markt ausgetretenen Firmen mit aufgeführt und der jeweiligen Fertigungsebene zugeordnet, um die Relationen in den unterschiedlichen Segmenten nochmals zu verdeutlichen.

Tabelle 4-32: Führende PV-Produzenten in Deutschland geordnet nach Fertigungsebene mit ihren jeweiligen Produktionskapazitäten für 2012 bis 2014 und den tatsächlich produzierten Mengen in den Jahren 2012 und 2013. Daten nach [Germany Trade & Invest 2014], [Podewils 2013] und [Franke 2014].

		Führende Produzenten der nationalen PV-Industrie		**Kapazität**			**Produktion**	
				Jahr			Jahr	
	Kennung	**Name**	**Sitz**	**2012**	**2013**	**2014**	**2012**	**2013**
Silizium	**S1**	Scheuten SolarWorld Solicium GmbH	Freiberg	-	-	1.000	-	-
	S2	Schmid Polysilicon Production	Spreetal	180	180	180	100	100
	S3	PV Crystalox Solar Silicon	Bitterfeld-Wolfen	1.800	1.800	1.800	0	0
	S4	Wacker Chemie AG	Nünchritz	-	15.000	15.000	-	14.000
	S5	Wacker Chemie AG	Burghausen	37.000	37.000	37.000	35.000	35.000
				Angaben in Tonnen				
Wafer	**W1**	PV Crystalox - PV Silicon	Erfurt	350	350	350	120	120
	W2	SolarWorld	Freiberg	750	750	750	750	750
	W3	SolarWorld (ex Bosch Solar Energy)	Arnstadt	700	720	720	460	630
	WX	Sovello AG	Thalheim	Marktaustritt Mai 2012				
	WX	Schott Solar Wafer GmbH	Jena	Marktaustritt Juni 2012				
Zellen	**Z1**	ITS Innotech Solar	Halle	-	-	100	-	0
	Z2	Sunways (LDK Solar)	Arnstadt	100	100	100	40	30
	Z3	SolarWorld	Freiberg	300	300	350	300	300
	Z4	SolarWorld (ex Bosch Solar Energy)	Arnstadt	700	720	750	460	630
	ZX	Sovello AG	Thalheim	Marktaustritt Mai 2012				
	ZX	Schott Solar AG	Alzenau	Marktaustritt Juni 2012				
	ZX	Solland Solar Cells GmbH	Aachen/Heerlen	Marktaustritt November 2013				
	ZX	Hanwha Q-Cells	Thalheim	Marktaustritt Februar 2015				
Module	**M1**	SOLARWATT	Dresden	200	200	200	100	80
	M2	Astronergy (ex Conergy)	Frankfurt (Oder)	250	250	460	100	100
	M3	SOLON (Microsol)	Berlin	80	80	80	20	20
	M4	asola Technologies (TUSAI Holding)	Erfurt	40	40	40	28	35
	M5	Heckert Solar	Chemnitz	150	170	170	75	90
	M6	Solar Direct Group	Burkau	-	-	25	-	-
	M7	ALGATEC Solar AG	Ebersbach	120	120	120	35	60
	M8	Sunset Solar	Löbichau	-	-	40	-	-
	M9	GSS	Korbußen	20	20	20	10	10
	M10	No-vo GmbH	Laubusch	-	-	10	-	-
	M11	SolarWorld	Freiberg	500	500	500	500	500
	M12	SolarWorld (ex Bosch Solar Energy)	Arnstadt	180	200	200	140	180
	M13	SCP Solar (ex Aleo Solar)	Prenzlau	280	280	280	190	150
	M14	JuraWatt	Neumarkt	50	20	20	23	20
	M15	Solar-Fabrik	Freiburg	210	210	210	100	80
	M16	Alfasolar GmbH	Hannover	40	40	40	17	35
	M17	ML&S Manufacturing GmbH	Greifswald	40	40	40	20	20
	M18	Solarnova	Wedel	30	30	30	20	25
	M19	AxSun Solar	Laupheim-Baustetten	20	20	20	-	20
	M20	Mage Sunovation	Elsenfeld	5	5	5	3	3
	M21	Soluxtec	Bitburg	-	-	-	-	-
	M22	Solar Industries Module	Freiburg	-	25	25	-	11,5
	M23	Axitec GmbH	Böblingen	-	-	-	-	-
	MX	Sovello AG	Thalheim	Marktaustritt Mai 2012				
	MX	Hanwha Q-Cells	Thalheim	Marktaustritt Februar 2015				
				Angaben in MW_p				

Legende:

- Für „-“ gekennzeichnete Zellen sind keine Daten verfügbar.
- Zeilen, deren Kennung nach dem ersten Buchstaben ein „X“ enthält (keine fortlaufende Nummer), kennzeichnen die Firmen der jeweiligen Fertigungsstufe, deren Produktion gestoppt wurde.

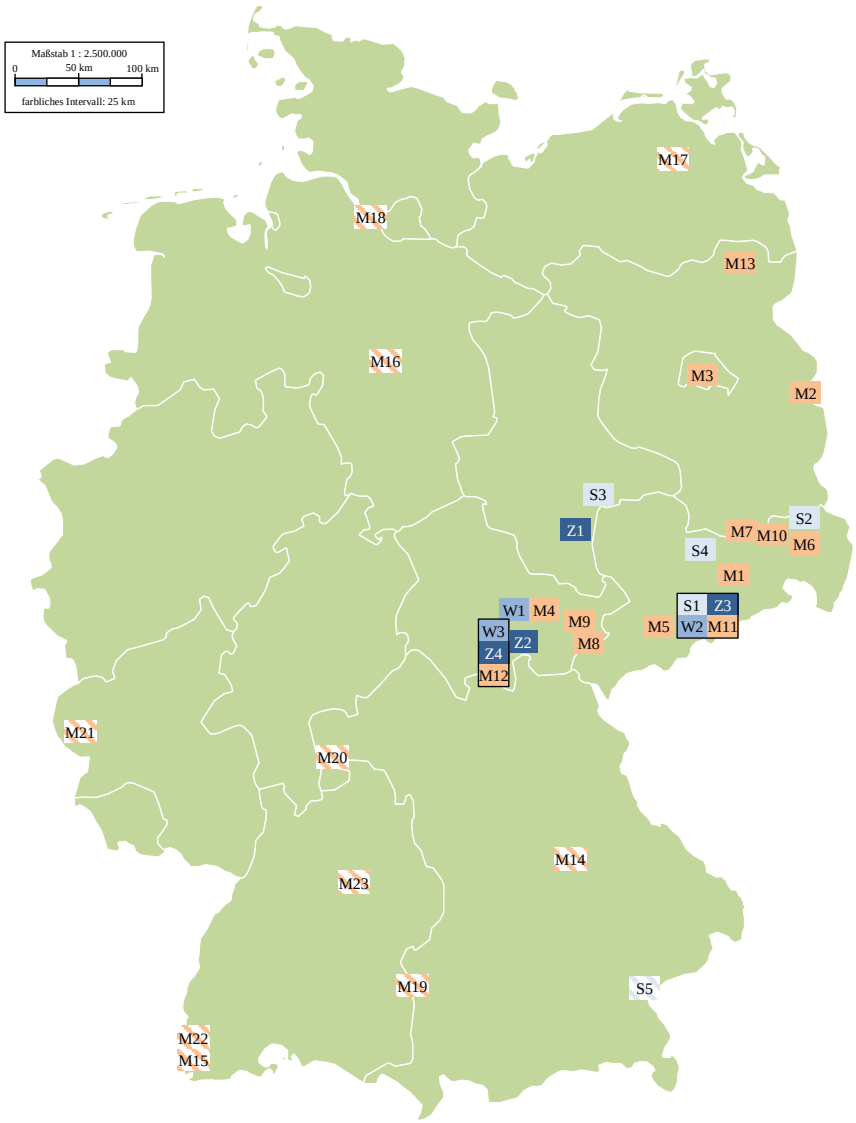
Aktuell (Stand Anfang 2015) liegen in Deutschland Gesamtproduktionskapazitäten für Solarsilizium in Höhe von knapp 55.000 t je Jahr, für kristalline Siliziumwafer in Höhe von 1.820 MW_p, für Siliziumsolarzellen 1.300 MW_p und zur Modulherstellung über 2.535 MW_p[109] vor. Bei der Solarsiliziumproduktion entfallen 94,5 % der nationalen Kapazitäten auf einen Hersteller: die Wacker Chemie AG mit ihren beiden Standorten zur Siliziumproduktion in Burghausen und Nünchritz. Ein ähnliches Bild ergibt sich auf den Ebenen der Waferproduzenten und der Zellenhersteller. Durch den Wegfall der Produktionskapazitäten von Sovello und Schott Solar Wafer sowie der Übernahme von Bosch Solar Energy durch SolarWorld liegen rund 80 % der nationalen Waferproduktionskapazitäten bei SolarWorld und ihren beiden Standorten in Freiberg und Arnstadt. Bei den national bestehenden Solarzellenproduktionskapazitäten hält SolarWorld sogar einen Anteil von 84,6 %. Anders stellt sich die Situation bei den Modulproduktionskapazitäten dar. Hier ist die national ansässige Produzentenanzahl wesentlich höher als auf den anderen Ebenen und die Produktionskapazitäten sind unter den einzelnen Firmen dispers verteilt; es herrscht keine Firmenkonzentration der Produktion wie bei der Solarsilizium-, der Wafer- und der Zellenproduktion vor. Auffallend ist, dass SolarWorld der einzige nationale Produzent ist, der für alle Siliziumsurrogate (vom Solarsilizium bis zum Modul) eigene Produktionskapazitäten besitzt; gebündelt am Standort Freiberg. Mit der Übernahme von Bosch Solar Energy konnte SolarWorld zudem einen weiteren Produktionsstandort (Arnstadt) mit gebündelten Produktionskapazitäten für kristalline Siliziumwafer, -zellen und -module gewinnen.

Im internationalen Vergleich zeigt sich die mittlerweile fast bedeutungslose Stellung der deutschen Photovoltaikindustrie besonders flagrant. Beispielshalber besitzt 2014 jeder der global zehn größten Zellenproduzenten eine höhere Solarzellenproduktionskapazität; die Top Vier sogar jeweils eine doppelt so hohe Produktionskapazität verglichen zur gesamten national vorhandenen (1.300 MW_p). [Neidlein 2014] Von den Top zehn befinden sich neun Produzenten im asiatisch-pazifischen Raum (sechs in China, drei in Taiwan). Bei der jährlichen Modulproduktionskapazität sind es Yingli Solar und Trina Solar (beides chinesische Unternehmen), die jeweils die gesamte in Deutschland verfügbare Kapazität ausweisen können. Unter den Top zehn der größten Modul-

[109] Hinzu kommen mehrere kleine spezialisierte Modulproduzenten mit jährlichen Fertigungskapazitäten unter 5 MW_p [ENF Ltd. 2015]. Allgemein lässt sich auch feststellen, dass sich besonders die „kleineren“ Modulproduzenten überwiegend auf die Produktion von Premiummodulen, Sonderanfertigungen und den Nachbau von defekten, heutzutage nicht mehr nachbestellbaren Modulen konzentrieren und so andere Marktsegmente als den stark umkämpften Massenmarkt fokussieren und abdecken.

produzenten findet sich kein in Deutschland ansässiger Produzent. [Mehta 2014] Auch in diesem Segment sind es ebenfalls Produzenten aus dem asiatisch-pazifischen Raum, die den Markt dominieren. Laut [Enkhardt 2014] stammten im Jahr 2013 90,4 % der global gefertigten Solarmodule aus dieser Region.

Aber nicht nur international gibt es mittlerweile ein starkes Gefälle, beziehungsweise eine lokale Konzentration der PV-Produzenten, auch national ist eine räumliche Agglomeration der PV-Industrie zu beobachten. Abbildung 4-51 lokalisiert hierfür die in Tabelle 4-32 aufgeführten und noch aktiven Produzenten der Siliziumsurrogate anhand der in der Tabelle 4-32 zugeordneten Kennung und Einfärbung.



Legende:

S5 → Solarsiliziumproduzent W2 → Waferproduzent Z1 → Zellenproduzent M8 → Modulproduzent

→ unternehmensinterne Produktionskapazitäten mehrerer Siliziumsurrogate an einem Produktionsstandort

M8 (schraffierte Füllung) → Produzent nicht Teil des ostdeutschen Produktionsclusters

Abbildung 4-51: Lokalisierung der führenden nationalen PV-Produzenten der Siliziumsurrogate nach Tabelle 4-32.

Auffällig ist in erster Linie, dass das Gros der nationalen PV-Industrie räumlich konzentriert vorliegt. Exklusive der Solarsiliziumproduktionsstätte von Wacker in Burghausen (Kennung S5) sind sämtliche nationalen Produktionskapazitäten von Solarsilizium, kristallinen Siliziumwafern und kristallinen Siliziumsolarzellen in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen verortet. Gleichwohl fällt eine räumliche Konzentration der nationalen Modulproduktionsstätten auf. 13 der 23 in Tabelle 4-32 aufgeführten Modulproduzenten haben ihren Produktionsstandort im sogenannten ostdeutschen Produktionscluster[110], welches die Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Brandenburg und Berlin umfasst. [Choi und Fthenakis 2010]; [El-Beyrouty 2009]; [Rothacher 2010]

Ein Vergleich der nationalen Produktionskapazitäten zeitigt ein ähnliches Bild. Die Summe der im ostdeutschen Produktionscluster vorhandenen Modulproduktionskapazitäten (in Tabelle 4-32 und Abbildung 4-51 nicht schraffierte orange eingefärbte Kennungen) machen 84,6 %[111] der national vorhandenen Produktionskapazitäten aus. Noch deutlicher gestaltet sich der Anteil der im ostdeutschen PV-Produktionscluster vorhanden Solarzellen- und Waferproduktionskapazitäten an den nationalen Gesamtkapazitäten. Dieser beträgt für beide Fälle 100 % ob der Absenz von nationalen Produktionskapazitäten außerhalb des benannten Clusters. Wenngleich auf der Produktionsebene von Solarsilizium zwar vier der national fünf vorhandenen Produktionsstätten im ostdeutschen PV-Produktionscluster verortet sind, beträgt deren Anteil an den national vorhandenen Produktionskapazitäten nur 32,7 %. Grund ist die im nationalen Vergleich formidable Produktionskapazität der einzig nicht im Cluster lokalisierten Produktionsstätte S5.

Aufgrund der räumlichen Agglomeration:

- der Standorte der Solarsiliziumproduzenten (vier der fünf national vorhandenen Produktionsstätten), sowie
- der vorhandenen Produktionskapazitäten aller anderen Fertigungsstufen der Siliziumsurrogate (100 % Anteil an den nationalen Gesamtkapazitäten im Falle der Wafer- und Solarzellenfertigung und 84,6 % im Falle der Modulfertigung)

in den Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters liegt der Fokus der nachstehenden Betrachtungen sowie etwaiger Berechnungen in subsekutiven Kapiteln,

[110] Das Produktionscluster ist als regionale Konzentration von Produzenten einer Wertschöpfungskette definiert. [Scheuplein 2002]

[111] Mit der anstehenden Schließung der Produktionsstätte von M15 am 30.06.2015 erhöht sich dieser Wert auf über 92 %.

welche auf in diesem Passus aufgeführten Daten basieren (beispielshalber die Schätzung der Quantität der Produktionsausschüsse und -abfälle im Kapitel 5.2.1.1), ausschließlich auf Produktionsstätten innerhalb des Clusters; ergo auf den in Tabelle 4-32 und Abbildung 4-51 nicht schraffiert gekennzeichneten Produzenten.

Wesentlich gewichtiger als die rein vorhandenen Produktionskapazitäten wiegen im Sinne der späteren Berechnung der lageabhängigen Produktionsabfälle indes die tatsächlich produzierten Mengen. Diese sind jedoch nicht vollends für alle in Tabelle 4-32 aufgeführten Produzenten verfügbar. Dieserhalb werden die ausstehenden Produktionsmengen der Tabelle 4-32 unter folgenden Annahmen geschätzt:

- Es handelt sich um konservative Schätzungen, um eine untere Schranke zu erhalten.
- Nur die ausstehenden Produktionsmengen für das Jahr 2013 werden geschätzt.
- Es werden die durchschnittlichen gewichteten Auslastungen aller nationalen Produzenten derselben Fertigungsebene zugrunde gelegt (über die Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters hinaus).
- Sind für 2013 keine Produktionskapazitäten bekannt, werden herstellerspezifisch die Produktionskapazitäten von 2014 supponiert.
- Grundlage bilden ausschließlich die Daten der Tabelle 4-32.
- Abweichende Annahmen werden gesondert an zutreffender Stelle diskutiert.

Insgesamt sind auf Basis der Schätzung der herstellerspezifischen Auslastung vier Produktionsmengen für 2013 zu berechnen, wobei auf die Ebene der Modulproduzenten drei Werte entfallen. Mit Hinblick auf die im ostdeutschen PV-Produktionscluster im Jahre 2014 gesamte zur Verfügung stehende Modulproduktionskapazität von 2.145 MW_p besitzen die entsprechenden Produktionsstätten M6, M8 und M10 einen Anteil von rund 3,5 %. Sonach ist selbst bei sehr ungenauen Schätzwerten kein großer Gesamtfehler, ausgehend von den berechneten Produktionsmengen, zu erwarten. Tabelle 4-33 zeigt alle relevanten Daten inklusiver der berechneten Produktionsmengen für 2013, der berechneten herstellerspezifischen Auslastungen und der geschätzten Auslastungen.

Tabelle 4-33: Führende PV-Produzenten des ostdeutschen PV-Produktionsclusters geordnet nach Fertigungsebene mit ihren jeweiligen Produktionskapazitäten für 2013 bis 2014 sowie der im Jahr 2013 tatsächlich produzierten Menge und der berechneten herstellerspezifischen Auslastung. Daten nach Tabelle 4-32.

	Führende Produzenten der PV-Industrie im ostdeutschen PV-Produktionscluster			**Kapazität**		**Produktionsmenge**	**Auslastung [%]**
	Kennung	**Name**	**Sitz**	**2013**	**2014**	**2013**	
Silizium	**S1**	Scheuten SolarWorld Solicium GmbH	Freiberg	-	1.000	850[a]	85[a]
	S2	Schmid Polysilicon Production	Spreetal	180	180	100	55,6
	S3	PV Crystalox Solar Silicon	Bitterfeld-Wolfen	1.800	1.800	0	0
	S4	Wacker Chemie AG	Nünchritz	15.000	15.000	14.000	93,3
				Angaben in Tonnen			
Wafe	**W1**	PV Crystalox - PV Silicon	Erfurt	350	350	120	34,3
	W2	SolarWorld	Freiberg	750	750	750	100
	W3	SolarWorld (ex Bosch Solar Energy)	Arnstadt	720	720	630	87,5
Zellen	**Z1**	ITS Innotech Solar	Halle	-	100	0	0[b]
	Z2	Sunways (LDK Solar)	Arnstadt	100	100	30	30
	Z3	SolarWorld	Freiberg	300	350	300	100
	Z4	SolarWorld (ex Bosch Solar Energy)	Arnstadt	720	750	630	87,5
Module	**M1**	SOLARWATT	Dresden	200	200	80	40
	M2	Astronergy (ex Conergy)	Frankfurt (Oder)	250	460	100	40
	M3	SOLON (Microsol)	Berlin	80	80	20	25
	M4	asola Technologies (TUSAI Holding)	Erfurt	40	40	35	87,5
	M5	Heckert Solar	Chemnitz	170	170	90	52,9
	M6	Solar Direct Group	Burkau	-	25	11,25	45[c]
	M7	ALGATEC Solar AG	Ebersbach	120	120	60	50
	M8	Sunset Solar	Löbichau	-	40	18	45[c]
	M9	GSS	Korbußen	20	20	10	50
	M10	No-vo GmbH	Laubusch	-	10	4,5	45[c]
	M11	SolarWorld	Freiberg	500	500	500	100
	M12	SolarWorld (ex Bosch Solar Energy)	Arnstadt	200	200	180	90
	M13	SCP Solar (ex Aleo Solar)	Prenzlau	280	280	150	53,6
				Angaben in MW_p			

Legende:

- Für „-“ gekennzeichnete Zellen sind keine Daten verfügbar.
- Rot markierte Zahlen sind auf Grundlage der Auslastungsschätzungen berechnet.
- Hochgestellte Indizes der Form [a]: Erläuterung im nachstehend Text

Die in der Tabelle 4-33 mit hochgestellten Indizes gekennzeichneten Zellen signalisieren Besonderheiten bei der Berechnung / Schätzung, auf die im Folgenden eingegangen wird.

- Index [a]: Entgegen der zuvor getroffenen allgemeinen Annahmen zur Schätzung der Auslastung von S1 und der darauf aufbauenden Berechnung der produzierten Menge Solarsilizium für das Jahr 2013 werden nicht die durchschnittlichen gewichteten Auslastungen aller nationalen Produzenten der entsprechenden Fertigungsebene zugrunde gelegt. S1 ist im Unternehmen SolarWorld eingegliedert und örtlich im Freiberger Produktionsstandort integriert (vgl. Abbildung 4-51, Seite 314). Konservativ wird für S1 eine Auslastung von

85 % geschätzt, da einerseits standortintern die Auslastungen der weiteren Produktionsanlagen zur Wafer-, Zellen- und Modulfertigung (W2, Z3 und M11) sämtlich 100 % betragen, andererseits SolarWorld unternehmensintern am weiteren Produktionsstandort mit gebündelten Produktionskapazitäten für kristalline Siliziumwafer, -zellen und -module in Arnstadt (W3, Z4 und M12) ebenfalls sehr hohe Auslastungen mit 87,5 % bis 90 % erreicht. Zusätzlich ergibt das gewichtet Mittel aller national tätigen Solarsiliziumproduzenten für 2013 (S2 bis S5) eine Auslastung von 90,96 %. Mittels der geschätzten Auslastung von S1 errechnet sich die im Jahr 2013 produzierte Menge an Solarsilizium über die Multiplikation mit der im selben Jahr vorhandenen Produktionskapazität zu 850 t.

- Index [b]: Für den Zellenproduzent mit der Kennung Z1 existieren keine Daten bezüglich der vorhandenen Produktionskapazität im Jahr 2013. Sonach müsste zur Berechnung der Auslastung die Produktionskapazität von 2014 zugrunde gelegt werden. Da jedoch keine Produktion stattfand, ist die Auslastung von der vorhandenen Produktionskapazität unabhängig und beträgt für jeden Fall 0 %.
- Index [c]: Zur Berechnung der fehlenden Produktionsmengen der Modulproduzenten M6, M8 und M10 muss im ersten Schritt deren Auslastung geschätzt werden. Die gewichtete durchschnittliche Auslastung aller anderen nationalen Modulproduzenten beträgt knapp 64 %. Im Falle der im ostdeutschen PV-Produktionscluster ansässigen übrigen Produzenten liegt dieser Wert nur geringfügig niedriger bei rund 59,2 %. Jedoch sind beide Werte von den großen beigesteuerten Gewichten des Unternehmens SolarWorld beeinflusst. Wie bereits mehrfach dargestellt, nimmt SolarWorld bei den Betrachtungen eine gesonderte Rolle ein, da es zwei Standorte mit jeweils gebündelten Produktionskapazitäten besitzt, welche im Vergleich zu den übrigen Modulproduzenten zudem mit sehr hohen Auslastungen aufwarten können. Wird nun SolarWorld bei der Berechnung der gewichteten durchschnittlichen Produktionsauslastung für den nationalen Fall und für die Clusterbetrachtung ausgeklammert, ergeben sich die Werte zu 49 % beziehungsweise zu knapp 47 %. Die konservative Schätzung zur Bildung einer unteren Schranke orientiert sich dieserhalb an den beiden letzteren Werten. Es wird sonach für alle drei Modulproduzenten eine Produktionsauslastung in Höhe von 45 % geschätzt. Die tatsächlich im Jahr 2013 produzierte Menge berechnet sich anschließend durch die Multiplikation der geschätzten Auslastung mit der herstellerspezifischen Produktionskapazität. Für alle drei Fälle (M6, M8 und

M10) existieren indes aber keine Daten bezüglich der Produktionskapazitäten im Jahr 2013. Dieserhalb muss zusätzlich zur Schätzung der Auslastung auch auf die herstellerspezifischen Produktionskapazitäten des Jahren 2014 zurückgegriffen werden.

In Summe wurden im Jahr 2013 folglich knapp 15.000 t Solarsilizium, 1.500 MW_p kristalline Siliziumsolarwafer, rund 960 MW_p kristalline Siliziumsolarzellen und circa 1.260 MW_p[112] Siliziumsolarmodule im ostdeutschen Produktionscluster hergestellt. National kamen nochmal 35.000 t Solarsilizium und etwas mehr als 215 MW_p Siliziumsolarmodule hinzu. Damit ist ein seit 2011 andauernder Trend jährlicher Verluste von nationalen Produktionskapazitäten sowie eines kontinuierlichen Rückgangs der produzierten Mengen deutlich erkennbar. Laut [Podewils 2013] erreichten die nationalen Produktionskapazitäten und die produzierte Menge von kristallinen Siliziumsolarzellen und Siliziumsolarmodulen jeweils 2011 ihren Höhepunkt, wobei Zellenproduktionskapazitäten von circa 2.700 MW_p und Modulproduktionskapazitäten von rund 3.500 MW_p zur Verfügung standen. Produziert wurden einstens laut [Podewils 2013] circa 2.150 MW_p Solarzellen und knapp 2.310 MW_p Solarmodule. Sonach reduzierte sich die nationale produzierte Menge von kristallinen Siliziumsolarzellen innerhalb von 2 Jahren um mehr als 55 % respektive um rund 36 % im Falle von Siliziumsolarmodulen. Mit der Schließung der deutschen Produktionsstätte von Hanwha Q-Cells im Februar 2015 setzt sich dieser Trend bei der nationalen Produktionsmenge von Siliziumsolarzellen und -modulen bis einschließlich 2015 weiter fort. Zukünftig ist zwar durch die von Bundeswirtschaftsminister erst jüngsthin zugesprochene Stärkung der Solarbranche [Sieg und Enkhardt 2015] von einer Schwächung des Negativtrends der deutschen Photovoltaikindustrie auszugehen, bestenfalls jedoch ein Stagnieren auf heutigem Niveau. Gleichwohl sieht [Ammon *et al.* 2013, S. 120] für die Photovoltaikindustrie im ostdeutschen PV-Produktionscluster mittel- bis langfristig durchaus Möglichkeiten den Negativtrend zu stoppen, gar teilweise umzukehren. Auf Basis einer SWOT-Analyse wurde die Nähe zu osteuropäischen Absatzmärkten als eine Stärke identifiziert. Diese besitzen zwar ein hohes Potenzial, die Initiierung dieser Märkte blieb indes, ausgenommen etwaiger sprunghafter Exzeptionen, bisher aus (vgl. Kap.: 4.2.2: „Europäische Erhebungen“).

[112] Ohne Hanwha Q-Cells.

Nennenswert ist auch die Tatsache, dass 2013 auf nationaler Ebene mehr Siliziumsolarmodule (rund 1.475 MW_p) produziert wurden als kristalline Siliziumsolarzellen (circa 960 MW_p). Dies zeigt einen weiteren Trend der deutschen Photovoltaikindustrie auf: den Import von kristallinen Siliziumsolarzellen als Grundlage zur Produktion von Siliziumsolarmodulen. Im Gegensatz zu SolarWorld, das genügend integrierte Solarzellenproduktionskapazitäten besitzt, respektive in Summe an seinen nationalen Standorten mehr kristalline Siliziumsolarzellen (im Jahr 2013: 930 MW_p) produziert, als es Siliziumsolarmodule fertigt (2013: 680 MW_p), sind das Gros der in Deutschland ansässigen Siliziumsolarmodulproduzenten ob der fehlenden nationalen Produktionskapazitäten auf den Zellenimport angewiesen. Viele Modulproduzenten wie beispielshalber die Heckert Solar AG oder die Solar Industries Module GmbH importieren Hochleistungszellen aus China und Taiwan. [Franke 2014] Mit dem Import dieser kristallinen Siliziumsolarzellen werden auch alle Ingredienzien wie Silber, Blei, Bismut und Aluminium mit eingeführt. Diese verbleiben jedoch nach Verarbeitung zu einem $gSSM_{sc/mc}$ nicht zwingend in Deutschland (Modulexport)[113], wohl aber der während der Fertigung eines $gSSM_{sc/mc}$ anfallende Produktionsausschuss.

Mittels des Recyclings jener Produktionsabfälle können die entsprechenden Mengen der durch den Zellenimport eingeführten Ingredienzien regional gebunden werden und so einen kleinen Beitrag zur Senkung möglicher stoffspezifischer Importabhängigkeiten leisten. Ähnlich verhält es sich mit importierten installierten Siliziumsolarmodulen, welche ihr Lebenszyklusende erreichen und einem regionalem Recycling zugeführt werden. Dies muss jedoch in entsprechender Qualität erfolgen, etwaigen rechtlichen Anforderungen genügen und wirtschaftlich betreibbar sein. Dieserhalb beschäftigt sich das gesamte nachfolgende Hauptkapitel mit entsprechenden Fragestellungen zu einem regionalen Recyclingansatz in verschiedenen Variationen. Gleichwohl werden technologische Fragestellungen adressiert sowie auf die Restriktionen und die Auswirkungen, die spezifische Recyclingprozesse zeitigen, eingegangen.

[113] Für einen Abfallstrom aus national installierten Solarmodulen ist nur die reine Installationsmenge ausschlaggebend; er ist herkunftsunabhängig.

KAPITEL 5

RECYCLING

Das Kapitel des Recyclings, als zentraler Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit, baut in vielseitiger Hinsicht auf dem vermittelten Wissen aller vorangegangenen Kapitel auf. Dieserhalb bleibt auch der zuvor getroffenen regionale wie technologische Fokus klar erhalten. So beziehen sich jedwede Aussagen und Diskussionen gänzlich auf die kristalline Siliziumsolartechnologie. Gleichwohl sind jedoch auch forthin weitere Grundlagen zu erarbeiten. Dies begreift neben der technologischen Ebene mit der Aufbereitung existierender Verfahren und der Untersuchung etwaiger Ansätze, welche noch Gegenstand der Forschung sind, in besonderer Weise die ökonomischen Zusammenhänge und die für ein Recycling von kristallinen Siliziumsolarmodulen relevanten gesetzlichen Rahmenbedingungen ein. Insofern ist zuvörderst die in diesem Hauptkapitel gängige Verwendung charakteristischer Begrifflichkeiten von der gesetzlichen Legaldefinition abzugrenzen. Dies betrifft zentrale Vokabeln wie Altmodul, Wieder- und Weiterverwendung, Wieder- und Weiterverwertung sowie den Betrachtungsgegenstand selbst: Recycling. Gleichwohl wird, wie im Laufe des Kapitels erörtert, auf die im

Gesetz zur Neuordnung des Rechts über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG) vom 20. Oktober 2015 eingeführte Unterscheidung in Altgeräte und historische Altgeräte verzichtet. Das Unterkapitel der rechtlichen Rahmenbedingungen sonach nicht einbegriffen, werden alle $gSSM_{sc/mc}$, denen die Abfalleigenschaft obliegt, nachfolgend als kristalline Siliziumsolaraltmodule bezeichnet (kurz: Altmodul; abgekürzt: $gSSM_{alt}$) – unabhängig der Ursache, der Installationshistorie oder sonstigen Parametern. Die Begriffe „Verwendung“ und „Verwertung“ zielen auf den Output etwaiger technologischer Maßnahmen zur Rückgewinnung der Bestandteile eines Altmoduls ab, wobei „Verwendung“ verfahrenstechnische Lösungen bezeichnet, die die Produktform einzelner Modulbestandteile beibehalten; bei der „Verwertung“ verlieren diese ihre Produktform. Im Gegensatz dazu zielt die weitere Differenzierung in Wieder- und Weiterverwendung oder Wieder- und Weiterverwertung auf den jeweiligen Absatzmarkt des generierten Verfahrensoutputs ab. „Wieder-“ bedeutet, dass der Rückstand in gleichartige Prozesse zurückgeführt wird; „Weiter-“ indessen, dass der Rückstand in einem, vom ursprünglichen Prozess abweichenden Verfahren eingesetzt wird – definitionsgemäß zumeist und voranglich branchenextern. Eine Differenzierung der Begrifflichkeiten ist sonach vor allem zwischen deren Gebrauch in den Kapiteln, die sich mit den rechtlichen Rahmenbedingungen auseinandersetzen, sowie den technisch und ökonomisch geprägten Kapiteln desiderat. Der Terminus Recycling umfasst in diesem Zusammenhang alle technologischen Maßnahmen zur Rückgewinnung, zuvörderst jedoch die gerade eingeführten verfahrenstechnischen Lösungsansätze der Wieder- und Weiterverwendung sowie Wieder- und Weiterverwertung – er dient als Hyperonym. Dies ist für die Diskussion übergreifender Effekte und Wechselwirkungen essenziell, da so allgemeine Betrachtungen trotz der Bandbreite der im Output und den potenziellen Absatzmärkten stark unterschiedlichen Verfahren transtechnologisch erfolgen können.

Neben der Diskussion der rechtlichen Rahmenbedingungen wird in diesem Kapitel das Recycling insbesondere hinsichtlich technischer und betriebswirtschaftlicher Restriktionen ausführlich untersucht. Hierzu wird ein Prognosemodell zukünftiger Altmodulaufkommen entwickelt, welches auch auf regionaler Ebene in Abhängigkeit der verfügbaren Datenqualität und -quantität entscheidende Potenziale identifizieren kann. Zusammen mit der umfassenden Betrachtung der technologischen Voraussetzungen und

Erfahrungswerte ufert dies in einer Diskussion der ökonomischen Leistungsfähigkeit potenzieller Recyclingaktivitäten unter verschiedenen Rahmenbedingungen. Dabei wird im Laufe der Betrachtung wiederum der Fokus auf die Region des ostdeutschen PV-Produktionsclusters gelegt. Hierzu werden die Break-evens der Nettogegenwartswerte für eine Vielzahl möglicher Ausprägungen der zugrunde liegenden Parameter berechnet und evaluiert. Die Untersuchung der ökonomischen Aspekte stellt zusätzlich zum Prognosemodell einen der zentralen Betrachtungsgegenstände und essenziellen Forschungsbeiträge dieses Kapitels und damit der vorliegenden Arbeit dar. Auf Basis dieser wirtschaftlichen Überlegungen erfolgt schließlich eine Bewertung technischer Konstruktionsbedingungen. Gleichwohl werden vornehmlich in den ökonomischen Betrachtungen Optimierungspotenziale diskutiert und auf deren realen Wirkung hin untersucht. Weiterer zentraler Aspekt ist die Frage, unter welchen Bedingungen etwaige Sekundärrohstoffe wieder in den Kreislauf zurückführen sind; sowohl branchenintern wie extern. Aber auch die Untersuchung ökonomischer und ökologischer Potenziale, die mit einem Recycling kristalliner Siliziumsolarmodule einhergehen (aufbauend auf den Erkenntnissen des Kapitels Produktion), steht verstärkt im Mittelpunkt der Betrachtungen – jedoch mit Fokus auf eventuelle brancheninterne Effekte.

Primäre Intension dieses Kapitels ist jedoch die Identifikation etwaiger Hemmnisfaktoren für die derzeitige Diskrepanz zwischen zur Verfügung stehender Verfahrenstechnik und dem realen Einsatz hochwertiger und die Funktionsmaterialien mit einbegreifender Recyclingansätze für kristalliner Siliziumsolaraltmodule. Diese werden letztlich aus der umfassenden Diskussion der rechtlichen, technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen gezielt abgeleitet und diskutiert.

Kapitelfeingliederung

5.1 Relevante europäische Gesetzgebung und nationale gesetzliche Restriktionen 326
5.1.1 Richtlinie 2008/98/EG und KrWG 327
5.1.2 WEEE2 und ElektroG2 336
5.1.3 RoHS und ElektroStoffV 364
5.1.4 Abfallverbringungsverordnung und -gesetz 365
5.1.5 Weitere relevante Gesetzestexte 367

5.2 Prognose des möglichen Altmodulaufkommens 369
5.2.1 Theoretische Grundlagen 370
5.2.1.1 Produktionsausschuss und -abfall 371
5.2.1.2 Abfallaufkommen kurz vor und während der Nutzungsphase 378
5.2.1.3 Altmodule am Ende der Nutzungsphase 406
5.2.2 Prognose der jährlichen Altmodulströme 412
5.2.2.1 Prozentuale Betrachtungen 412
5.2.2.2 Absolute Betrachtungen 416
5.2.2.3 Sensitivitätsanalyse ausgewählter Parameter 436
5.2.2.4 Regionale Betrachtungen 444
5.2.2.5 Weitere Empfehlungen und Effekte eines Bestands- respektive Recyclingpotenzialkataster 454

5.3 Technologische Ansätze und erprobte Verfahren 456
5.3.1 Status quo des Recyclings kristalliner Siliziumsolarmodule 462
5.3.2 Recyclingverfahren der SolarWorld AG 464
5.3.3 Recyclingansatz nach Park *et al.* 2016 473
5.3.4 Recyclingansatz der Loser Chemie GmbH 474
5.3.5 Recyclingverfahren der LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG 475
5.3.6 Recyclingansatz der Accurec Recycling GmbH 478
5.3.7 Recyclingansatz der Saperatec GmbH 480
5.3.8 Weitere Recyclingverfahren und -ansätze 481
5.3.9 Zusammenfassende Betrachtungen der Recyclingverfahren und -ansätze 487

5.4 Ökonomische Aspekte 510
5.4.1 Einführende Betrachtungen und Funktionsherleitung 511
5.4.2 Erlösseite 514
5.4.2.1 Marktpreise und resultierender Einzelerlös 515
5.4.2.2 Absatzmärkte Sekundärrohstoffe 522

5.4.3 Kostenseite 526
5.4.3.1 Verfahrenskosten 526
5.4.3.2 Sammel- und Transportkosten 535
5.4.4 Mengenspezifik 554
5.4.4.1 Weitergabe von Produktionsabfällen 555
5.4.4.2 Zweitmarkt 557
5.4.4.3 Kapazitäten der Recyclingaktivitäten 559
5.4.5 Übergreifende Betrachtungen 566
5.4.5.1 Statisches Modell 575
5.4.5.2 Dynamisches Modell 579
5.4.5.3 Nettogegenwartswert 592
5.4.6 Ergebnisanalyse 607

5.5 KONSTRUKTIONSBEDINGTE BEEINFLUSSUNGEN DER ÖKONOMISCHEN ASPEKTE 611
5.5.1 Recyclingorientiertes Moduldesign 611
5.5.1.1 Einsatz von Zwischenfolien 613
5.5.1.2 Modifikation der Modulrahmung 613
5.5.1.3 Substitution des Verkapselungsmaterials 615
5.5.1.4 Regionalspezifische Modulkonzeption 616
5.5.2 Potenzielle Materialsubstitutionen und Reduktion spezifischer Ingredienzien 618
5.5.2.1 Zellen und Verbinder 618
5.5.2.2 Verkapselungsmaterial 624
5.5.2.3 Glas 625
5.5.3 Produkttypung 627

5.6 OPTIMIERUNGSANSÄTZE DER BESCHAFFUNGSLOGISTIK 629
5.6.1 Kurz- und mittelfristige Planungsphase 629
5.6.1.1 Sweep-Algorithmus 630
5.6.1.2 Savings-Verfahren 631
5.6.1.3 Zirkelmethode 632
5.6.1.4 Neuere Ansätze und weitere Aspekte 632
5.6.2 Langfristige Planungspahse 633
5.6.2.1 Erhöhung der Anlagenzahl 634
5.6.2.2 Integrierung einer Sortieranlage 636
5.6.2.3 Nutzung eines Zwischenlagers 637
5.6.2.4 Weitere Aspekte 639
5.6.3 Regionales Recyclingnetzwerk und sonstige Effekte 640

5.1 Relevante europäische Gesetzgebung und nationale gesetzliche Restriktionen

Mit dem Fokus auf das Recycling von kristallinen Siliziumsolarmodulen verfolg dieses Kapitel zwei Zielsetzungen. Einerseits sollen die rechtlichen Rahmenbedingungen für ein mögliches Recycling dieser Photovoltaikmodule dargelegt werden, wobei in den Kapiteln 5.1.1 bis 5.1.3 die jeweiligen europäischen Richtlinien ihren nationalen Pendants zugeordnet sind. Andererseits liegt es den aufgegriffenen Gesetzestexte ob, in den Diskussionen der subsekutiven Kapitel (auch) als Argumentation zu sekundieren. Die Wahl, die nachstehenden Unterkapitel nicht nach der Gesetzgebungsebene zu unterteilen, ergo die europäische und nationale Nomothesie nicht getrennt darzustellen, hat mehrere Gründe. Erstens sind die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union (nachfolgend mit EU abgekürzt) verpflichtet die von der EU erlassenen Richtlinien vollständig und nicht selektiv oder nur teilweise in nationales Recht umzusetzen. Wenngleich den Mitgliedsstaaten bei der Umsetzung von europäischen Richtlinien in nationales Recht im Artikel 288 Absatz 3 des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union (kurz: AEUV) ein Gestaltungsspielraum, was „[…] die Wahl der Form und der Mittel“ betrifft, eingeräumt wird, sind diese an die richtlinienspezifischen Zielvorgaben gebunden. Dies hat zur Folge, dass die nationalen Umsetzungen den zugrunde liegenden europäischen Richtlinien sowohl in der Struktur, als auch im Wortlaut ähnlich sind, respektive sich mehrenteils stellenweise gleichen. Dieserhalb würde eine getrennte Betrachtung der europäischen Richtlinien und ihrer nationalen Pendants zu Dopplungen führen und sich so nur arg unübersichtlich darstellen lassen. Zweitens behandelt die entsprechende nationale Umsetzung einer europäischen Richtlinie denselben Gegenstand, beziehungsweise verfolgt denselben Zweck. Mit Blick auf die Übersichtlichkeit und Verständlichkeit der Diskussion ist sonach die gebündelte Betrachtung einer getrennten ebenfalls vorzuziehen. Drittens lassen sich so Vergleiche zwischen europäischer Richtlinie und ihrer nationalen Umsetzung direkt, kapitelintern und themengebunden formulieren.

Weiter folgt die Gliederung der Unterkapitel dem Spezialisierungsgrad der Rechtsprechung. Dieserhalb widmet sich das erste Unterkapitel der übergeordneten Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und Rates über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien – der sogenannten Abfallrahmenrichtlinie (nicht amtlicher Kurztitel), beziehungsweise dem Gesetz zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und

Abfallrechts (im Folgenden mit KrWG abgekürzt), welche den allgemeinen Betrachtungsraum zum Abfallbegriff und Recycling beschreiben, die Nomenklatur legal definieren sowie grundsätzliche Anforderungen, Ziele und Verantwortungsbereiche darlegen. Im zweiten Unterkapitel wird die aktuelle Gesetzgebung für den speziellen Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit herausgegriffen; der Umgang mit Elektro- und Elektronik-Altgeräten. Darauf folgt eine weitere Eingrenzung der betrachteten Gesetzestexte hin zum etwaigen Verwendungsverbot einzelner Stoffe und Stoffgruppen. Abschließend werden weitere, für das Recycling von kristallinen Siliziumsolarmodulen relevante Gesetzestexte und Richtlinien dargestellt und andiskutiert.

5.1.1 Richtlinie 2008/98/EG und KrWG

Das Abfallrecht und der Umgang mit Abfällen in der EU basiert auf einer Fülle an einseitigen sekundären Rechtsakten. Wenngleich auf EU-Ebene erlassene Verordnungen unmittelbar und verbindlich für alle Mitgliedsstaaten gelten, müssen europäische Richtlinien, wie bereits geschildert, erst in nationales Recht transferiert werden. Im Bereich der Abfallwirtschaft nimmt die Richtlinie 2008/98/EG vom 19. November 2008 des europäischen Parlaments und Rates über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien eine besondere und übergeordnete Stellung ein. Auf Grund ihrer Natur als europäische Richtlinie legt sie den rechtlichen Rahmen der Abfallgesetzgebung in den Mitgliedsstaaten fest und beinhaltet wesentliche Vorgaben für das deutsche Abfallrecht. Auf europäischer Ebene trifft sie allgemeine Unterweisungen für nahezu alle Abfallarten und wird dieserhalb sowohl im volkstümlichen Sprachgebrauch als auch in der Fachliteratur zumeist Abfallrahmenrichtlinie genannt. Wie in ihrem eigenen Titel erwähnt und in ihrem Artikel 41 Satz 1 konkretisiert, trat die Richtlinie 2008/98/EG (im Folgenden als Abfallrahmenrichtlinie bezeichnet) seit dem 12. Dezember 2010 an die Stelle ihres direkten Vorgängers: der 2006/12/EG (Richtlinie über Abfälle) und hob zudem die europäischen Richtlinien 91/689/EWG (Richtlinie über gefährliche Abfälle) sowie 75/439/EWG (Richtlinie über die Altölbeseitigung) auf, wobei deren Integration in die aktuelle Abfallrahmenrichtlinie laut den Erwägungsgründen 43 und 44 dem Zwecke der Vereinheitlichung und Simplifizierung des Gemeinschaftsrechts diente.

In ihrer Neufassung von 2008 fixiert die Abfallrahmenrichtlinie nach Erwägungsgrund 8 einerseits die substanziellen Begrifflichkeiten des Abfallrechts wie Abfall, Verwertung und Beseitigung. Andererseits soll sie dem gleichen Erwägungsgrund folgend auch „die Maßnahmen zur Abfallvermeidung […] stärken“ und „den Schwerpunkt auf die Reduzierung der Umweltauswirkungen von Abfallerzeugung und -bewirtschaftung […] setzen, wodurch der wirtschaftliche Wert von Abfall erhöht wird. Darüber hinaus sollten die Verwertung von Abfällen sowie die Verwendung verwerteter Materialien zur Erhaltung der natürlichen Rohstoffquellen gefördert werden.“ [Grund 8 RL 2008/98/EG]

Nach Artikel 2 Absatz 1 bis 3 der Abfallrahmenrichtlinie werden jedoch einige Abfallgruppen, wie beispielshalber gasförmige Ableitungen, Fäkalien, radioaktive Abfälle, ausgesonderte Sprengstoffe et cetera, aus dem Anwendungsbereich ausgeschlossen und sind anderweitig abzudecken.

Mit der Definition der abfallrechtlichen Begrifflichkeiten im Artikel 3 führt die Novelle im vierten Artikel als einer ihrer zentralen Punkte eine fünfstufige Abfallhierarchie ein, welche die nachstehende Prioritätenfolge vorgibt:

- Vermeidung vor
- Vorbereitung zur Wiederverwendung vor
- Recycling vor
- Sonstiger Verwertung wie die energetische Verwertung vor
- Beseitigung

In Verbindung mit der getroffenen Definition von Recycling als „jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber nicht die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind;“ [Artikel 3 Nummer 17 RL 2008/98/EG] legt die Abfallrahmenrichtlinie sonach erstmals einen expliziten Vorrang der stofflichen Verwertung[114] vor der energetischen Verwertung in allgemeiner Form fest, wobei sie im Artikel 4 Absatz 2 mit Blick auf den Umweltschutz auch eine Möglichkeit zur Abweichung von der Hierarchie aufzeigt.

[114] Sonach zählt beispielshalber die Kompostierung von Abfällen als stoffliche Verwertung, die Verfüllung von Bergwerkshohlräumen mit Bergversatz und die Herstellung von Ersatzbrennstoffen hingegen nicht [IHK Karlsruhe o.J.].

Ein weiterer zentraler Punkt der Novelle ist die neu eingeführte, strukturierte Abgrenzung zwischen Abfällen und Nebenprodukten, sowie die Definition des Endes der Abfalleigenschaft. In Artikel 5 und 6 der Abfallrahmenrichtlinie finden sich für beide Sachverhalte entsprechende Mindestvoraussetzungen. Die Unterscheidung zwischen Produkt, Nebenprodukt und Abfall ist für die Produzenten und die Akteure der Abfallwirtschaft höchlich von Bedeutung, da ein Ende der Abfalleigenschaft oder die Geltendmachung als Nebenprodukt einen Stoff oder Gegenstand von den Vorschriften des Abfallrechtes entbindet.

Weiters stärkt die Abfallrahmenrichtlinie die Möglichkeit der Mitgliedsstaaten „[…] Maßnahmen mit und ohne Gesetzescharakter […]“ [Artikel 8 Absatz 1 RL 2008/98/EG] zu erlassen, die die Herstellerverantwortung im Sinne der Verbesserung der Wiederverwendung, der Vermeidung, des Recyclings und der sonstigen Abfallverwertung konsolidieren. Diese Maßnahmen können nach Artikel 8 beispielshalber:

- eine Rücknahmeverpflichtung zurückgegebener Erzeugnisse,
- eine finanzielle Verantwortung für die Bewirtschaftung von Abfällen,
- eine öffentlich zugängliche Informationspflicht über die Wiederverwendbarkeit und Recycelbarkeit von Produkten sowie
- eine Förderung zur Entwicklung, Herstellung und das Inverkehrbringen mehrfach verwendbarer und technisch langlebiger Erzeugnisse

umfassen, wobei die erweiterte Herstellerverantwortung und deren Umsetzung in nationales Recht keine Verpflichtung für die Mitgliedsstaaten darstellt.

Ebenfalls sind die Mitgliedsstaaten nach Artikel 11 Absatz 1 Satz 2 der Abfallrahmenrichtlinie angehalten ein qualitativ hochwertiges Recycling mittels der Einführung getrennter Abfallsammlungen im Rahmen der technischen, ökologischen und ökonomischen Durchführbarkeit zu fördern. Ingleichen sind die Mitgliedsstaaten verpflichtet nach Absatz 2 desselben Artikels bis 2020 mindestens 50 Gew.-% von Abfallmaterialien wie Papier, Metall, Kunststoff und Glas zu recyceln oder zur Wiederverwendung vorzubereiten; für nicht gefährliche Bau- und Abbruchabfälle liegt die Mindestverwertungsquote bei 70 Gew.-% im gleichen Zeitraum.

Im Anhang 2 der Abfallrahmenrichtlinie wird zudem eine Energieeffizienzformel eingeführt, deren berechneter Wert klar definiert, wann und ob eine Behandlung fester Siedlungsabfälle in einer Verbrennungsanlage als Verwertungsverfahren oder als Beseitigungsverfahren anzusehen ist. Die Energieeffizienzformel stellt vereinfacht gesehen einen Quotienten aus Energieoutput und Energieinput dar und wird in der Fußnote (*) des Anhangs 2 der Abfallrahmenrichtlinie genau definiert. Beträgt der berechnete Wert mindestens 60 %, gilt die Verbrennung als Verwertungsverfahren – anderenfalls als Abfallbeseitigung. Für nach dem 31. Dezember 2009 genehmigte Anlagen gelten indes 65 % als Schwellenwert.

Die europäische Richtlinie 2008/98/EG wurde mittels des am 01. Juni 2012 inkraftgetretenen Gesetzes zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts (kurz: KrWG) in deutsches Recht umgesetzt. Infolgedessen wurde das deutsche Abfallrecht modernisiert und bedachtsam fortentwickelt. Die Absicht des KrWG liegt vordergründlich in der Stärkung der stofflichen Verwertung und der Abfallvermeidung im Zuge einer höherwertigen Ressourceneffizienz in der Abfallwirtschaft sowie einer nachhaltigen Verbesserung des Klima- und Umweltschutzes. Gleichwohl soll die Implementation der neu eingeführten zentralen Punkte der Abfallrahmenrichtlinie wie Begrifflichkeiten, die fünfstufige Abfallhierarchie, die Abgrenzung zwischen Abfall und Nebenprodukt, die Definition des Endes der Abfalleigenschaft et cetera die rechtssichere Gesetzesanwendung sicherstellen und hinderliche bürokratische Strukturen simplifizieren [BMUB 2012].

Ähnlich der Abfallrahmenrichtlinie werden im § 2 Absatz 2 des KrWG bestimmte Abfallgruppen und -stoffe vom Geltungsbereich des Gesetzes befreit, jedoch unter Angabe der dafür zutreffenden nationalen Rechtsvorschriften – soweit vorhanden. Auch die Definitionen der zentralen Begrifflichkeiten bezüglich der ebenfalls neu eingeführten fünfstufigen Abfallhierarchie sind nahezu deckungsgleich. Lediglich für die Definition des Ausdruckes „Vermeidung“ sind kleine Abweichungen gegeben. Wenngleich die Definitionen in der Abfallrahmenrichtlinie und im KrWG für den Ausdruck „Vermeidung“ inhaltsgleich sind, werden in der deutschen Umsetzung noch Konkretisierungen getroffen (vgl. § 3 Absatz 20 KrWG i.V.m. Artikel 3 Nummer 12 RL 2008/98/EG). Weiter wird in der deutschen Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie der Begriff „Behandlung“ durch „Abfallentsorgung“ substituiert [§ 3 Absatz 22 KrWG und Artikel 3 Nummer 14 RL 2008/98/EG].

Als ein hervorzuhebender Punkt bleibt die Unterscheidung zwischen Wiederverwendung in Verbindung mit der Vorbereitung zur Wiederverwendung und der Definition des Recyclings im KrWG festzuhalten, da der korrekten Verwendung dieser Begrifflichkeiten in der Diskussion subsekutiver Kapitel eine außerordentliche Rolle zukommt:

- Wiederverwendung nach § 3 Absatz 21 KrWG: „[…] ist jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren."
- Vorbereitung zur Wiederverwendung nach § 3 Absatz 24 KrWG: „[…] ist jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere Vorbehandlung wieder für denselben Zweck verwendet werden können, für den sie ursprünglich bestimmt waren."
- Recycling nach § 3 Absatz 25 KrWG: „[…] ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind."

Ein Hauptunterschied zwischen dem Begriff der Wiederverwendung und den beiden anderen Begrifflichkeiten liegt darin, dass sich die Wiederverwendung als Form der Abfallvermeidung ob der gegebenen Absenz der Abfalleigenschaft präsentiert. Hat ein Erzeugnis oder ein Erzeugnisbestandteil die Abfalleigenschaft nach § 3 Absatz 1 KrWG inne und kommen nur Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur zum Einsatz unterscheidet sich die Vorbereitung zur Wiederverwendung vom Recycling durch den enger gefassten Verwendungszweck. Im Falle vom Recycling kann der Wiedereinsatz sowohl im Bereich des ursprünglichen Zweckes, als auch zweckfremd erfolgen. Weiter umfasst Recycling auch stoffliche Verwertungsverfahren über die Reparatur, die Reinigung oder die Prüfung (Vorbereitung zur Nutzung ohne weiter Vorbehandlungen) hinaus; in diesem Falle wird nicht von Vorbereitung, sondern von Aufbereitung gesprochen.

Neben der Implementation der in der Abfallrahmenrichtlinie vorgegebenen fünfstufigen Abfallhierarchie wurden auch die zentralen und neu eingeführten Regelungen zur Abgrenzung von Stoffen oder Gegenständen als Nebenprodukt (§ 4 Absatz 1 KrWG) und die Definition des Endes der Abfalleigenschaft (§ 5 Absatz 1 KrWG) nahezu wortgleich, mindestens jedoch inhaltsgleich übernommen. In den entsprechenden Paragrafen des KrWG wurde zudem vom, durch die Abfallrahmenrichtlinie vorgegebenem, Gestaltungsspielraum der ergänzenden Maßnahmen Gebrauch gemacht und jeweils im zweiten Absatz der §§ 4 und 5 des KrWG festgehalten.

Die fünfstufige Abfallhierarchie stellt analog der Abfallrahmenrichtlinie auch im KrWG einen zentralen Punkt dar. Mit ihrer Umsetzung im sogenannten Grundpflichtmodell (§§ 6 - 8 KrWG) wird die Prioritätenfolge definiert und die Kreislaufwirtschaft sichtbar zugunsten der Abfallvermeidung und der stofflichen Verwertung ausgerichtet [BMUB 2012]. Wenngleich § 6 Absatz 1 des KrWG eine Rangfolge der Maßnahmen vorgibt, wird diese im zweiten Abschnitt des Paragrafen mit Blick auf „[…] den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips […]“ [§ 6 Absatz 2 Satz 1 KrWG] aufgeweicht. Weiter müssen bei der Vorrangsentscheidung neben der ökologischen Perspektive auch die technische Realisierbarkeit, die wirtschaftliche Zumutbarkeit und soziale Folgen mit einbezogen werden. Zudem hat nach § 8 Absatz 1 KrWG innerhalb der Verwertungsmaßnahmen (Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling und sonstige Verwertung wie beispielshalber energetische Verwertung) jene Vorrang, „[…] die den Schutz von Mensch und Umwelt nach der Art und Beschaffenheit des Abfalls unter Berücksichtigung der in § 6 Absatz 2 Satz 2 und 3 festgelegten Kriterien am besten gewährleistet.“ [§ 8 Absatz 1 Satz 1 KrWG] Dies ist insofern für das Recycling von kristallinen Siliziumsolarmodulen von Bedeutung, als dass, unter Vorbehalt der technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit, die Solarmodule so zu verwerten sind / sein sollten, dass die Siliziumsolarzellen im Ganzen aus dem Prozess ausgeschleust werden. Hierdurch entfiele die energieintensive Siliziumaufreinigung, was nach § 6 Absatz 2 Satz 3 Nummer 1 bis 4 des KrWG den Vorrang dieser Verwertungsmaßnahme nach sich ziehen würde. Allerdings kann die Bundesregierung mittels abfallspezifischer Rechtsverordnungen nach $ 8 Absatz 2 KrWG für spezielle Abfallgruppen den Vorrang oder Gleichrang der Verwertungsmaßnahmen vorgeben. Weiter beinhaltet der Paragraf im dritten Absatz die sogenannte Heizwertklausel als Übergangsregelung.

Nationales und europäisches Abfallrecht sind indes nicht vollends deckungsgleich. Dies zeigt eine vergleichende Betrachtung der durch die Abfallrahmenrichtlinie vorgegebenen und bereits diskutierten Recyclingquoten nach Artikel 11 Absatz 2 der RL 2008/98/EG und der im KrWG nach § 14 Absatz 2 und 3 definierten Ziele. Zum einen kommt die nationale Gesetzgebung im § 14 Absatz 1 des KrWG der Forderung der Abfallrahmenrichtlinie zur Förderung eines qualitativ hochwertigen Recyclings mittels getrennter Sammlungen (Artikel 11 Absatz 1 Satz 2 und 3 RL 2008/98/EG) von Papier-, Metall-, Kunststoff- und Glasabfällen nach. Zum anderen übersteigen die national einzuhaltenden Mindestquoten der Vorbereitung zur Wiederverwendung und des Recyclings von Siedlungsabfällen mit gegebenen 65 Gew.-% jene nach Abfallrahmenrichtlinie geforderten 50 Gew.-%. Im Bereich der nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfälle gleichen sich beide Rechtsvorschriften wiederum bezüglich der vorgegebenen stofflichen Verwertungsquote von mindestens 70 Gew.-%. Die zum Teil höher definierten Mindestquoten des deutschen Abfallrechts sollen der im europäischen Vergleich höher entwickelten nationalen Abfallwirtschaft Rechnung tragen und gleichwohl weitere Anreize zur steten Fortentwicklung liefern. Dies zeigt sich auch im § 14 Absatz 3 Satz 3 des KrWG. Sonach soll bis Ende 2016 die Zielvorgabe für die stoffliche Verwertung nicht gefährlicher Bau- und Abbruchabfälle überprüft und im Sinne des bestehenden nationalen Recyclingniveaus gegebenenfalls gesteigert werden.

Neben den vorgegebenen hierarchisch angeordneten Verwertungsmaßnahmen stellt die erste Stufe der Prioritätenfolge nach § 6 Absatz 1 Nummer 1 bis 5 des KrWG eine, mit Blick auf die Steigerung der Ressourceneffizienz in einer kontemporären Abfallwirtschaft, grundlegende Maßnahme dar: die Abfallvermeidung. Diesbezüglich ist das Konzept der Produktverantwortung sowohl aus der nationalen, als mittlerweile auch aus der europäischen Abfallgesetzgebung nicht mehr wegzudenken. Die Produktverantwortung ist im dritten Teil des KrWG verankert; genauer in den §§ 23 bis 27. Die Produktverantwortung beinhaltet prinzipiell die Pflicht Erzeugnisse möglichst so zu gestalten, „[…] dass bei ihrer Herstellung und ihrem Gebrauch das Entstehen von Abfällen vermindert wird und sichergestellt ist, dass die nach ihrem Gebrauch entstandenen Abfälle umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden.“ [§ 23 Absatz 1 Satz 2 KrWG] Sonach wird bei der Produktverantwortung nicht nur der Abfall am Nutzungsende betrachtet, sondern der gesamte Lebenszyklus mit einbezogen. Sie richtet sich nach § 23 Absatz 1 Satz 1 KrWG an alle Hersteller und Vertreiber von Erzeugnissen,

wobei dieser Adressatenkreis Entwickler, Hersteller, Verarbeiter und Vertreiber einbegreift [Gattermann 2013, S. 72]. Neben der bereits genannten „abfallvermindernden Gestaltungspflicht“ konkretisiert das KrWG in den Nummern 1 bis 5 des zweiten Absatzes des § 23 die Grundpflichten der Produktverantwortung. So sollen nach Nummer 1 Erzeugnisse entwickelt, hergestellt oder in den Verkehr gebracht werden, „[…] die mehrfach verwendbar, technisch langlebig und nach Gebrauch zur ordnungsgemäßen, schadlosen und hochwertigen Verwertung sowie zur umweltverträglichen Beseitigung geeignet sind“ [§ 23 Absatz 2 Satz 1 KrWG]. Dies scheint im Falle von kristallinen Siliziumsolarmodulen auf den ersten Blick gegeben. Nummer 2 desselben Absatzes gibt eine Nutzungspriorisierung von Sekundärrohstoffen oder verwertbaren Abfällen bei der Erzeugnisproduktion vor, was unter technischer, wirtschaftlicher und sozialer Zumutbarkeit einen Anreiz zum Recycling von Photovoltaikmodulen allgemein, sowie zum Wiedereinsatz von auf dieserart gewonnenen Rohstoffen setzt. Weiter gibt das KrWG im § 23 Absatz 2 Nummer 4 in Verbindung mit § 24 Nummer 7 eine Kennzeichnungspflicht vor, die Hinweise auf beispielshalber Obliegenheiten bezüglich der Rückgabe, Wiederverwendung und Verwertung geben sollen. Für Photovoltaikmodule wird dies im Gesetz zur Neuordnung des Rechts über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro und Elektronikgeräten (ElektroG-Novelle) durch die Einführung eines standardisierten Symbols konkretisiert. Als zentrales Element der Produktverantwortung wird jedoch Nummer 5 des § 23 Absatz 2 des KrWG angesehen. Dieser Pasus regelt die Rücknahmeverpflichtung seitens der Produzenten, welches schließlich die Prämisse der Entsorgungspflicht darstellt. In Verbindung mit § 27 KrWG befinden sich die Vertreiber und Hersteller nach Rücknahme der Erzeugnisse in der Rechtsstellung des Besitzers, wodurch sie der Entsorgungspflicht unterliegen. [Gattermann 2013, S. 79 ff]

§§ 25 und 26 des KrWG konkretisieren weiter die Anforderungen, Pflichten und Möglichkeiten, die mit der Rücknahme von Erzeugnisse einhergehen. Darunter fällt beispielshalber, dass die Hersteller und Vertreiber geeignete Maßnahmen zur Rückgabe zu treffen haben (wie die Einrichtung von, oder die Beteiligung an Rücknahmesystemen) und dass sie Nachweis über „[…] die in Verkehr gebrachten Produkte und deren Eigenschaften, über die Rücknahme von Abfällen, über die Beteiligung an Rücknahmesystemen und über Art, Menge, Verwertung und Beseitigung der zurückgenommenen Abfälle […]“ [§25 Absatz 1 Nummer 4 KrWG] zu führen haben.

Weiter können Hersteller und Vertreiber nach § 26 des KrWG eine freiwillige Rücknahme in einem entsprechenden eigenständig aufgebauten System (auch durch die Beauftragung Dritter) forcieren, wodurch sie weniger aufwendigen Nachweisführungspflichten unterliegen (§ 26 Absatz 3 KrWG); jedoch unter Einhaltung von Zielvorgaben, welche durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit vorgegeben werden (§ 26 Absatz 1 KrWG). Verwertungs- und Rücknahmeverpflichtung nach dem KrWG stellen sonach ein Instrument zur Realisierung der Produktverantwortung dar und werden dieserhalb oftmals als „Hebel der Produktverantwortung“ bezeichnet. [Gattermann 2013, S. 79f]

Darüber hinaus waren im Sinne der dynamischen und kontinuierlichen Fortentwicklung der Ansätze und Instrumente der Abfallvermeidung nach Artikel 29 der Abfallrahmenrichtlinie bis 12. Dezember 2013 durch die Mitgliedsstaaten Abfallvermeidungsprogramme zu erstellen. Dem kommt der deutsche Gesetzgeber mit dem § 33 des KrWG nach, indem er primär dem Bund, unter Beteiligung der Länder für den eigenen Verantwortungsbereich, die Verpflichtung zur Erstellung des Abfallvermeidungsprogrammes auferlegt. Es soll die im § 33 Absatz 3 Nummer 1 bis 4 aufgezählten Punkte, wie beispielshalber die Festlegung von Abfallvermeidungszielen und die Darstellung bestehender Abfallvermeidungsmaßnahmen, beinhalten. Forciert wird mit dem Konzept der neuen Regelung zudem eine Minimierung des erforderlichen bürokratischen Aufwandes. [BMUB 2012] Dieser Verpflichtung ist der Bund im Juli 2013 nachgekommen. Das entsprechende Dokument findet sich in [BMU 2013].

Neben der Erstellung eines Abfallvermeidungsprogrammes schreibt die Abfallrahmenrichtlinie auch die Erstellung von Abfallbewirtschaftungsplänen vor. Die nationale Umsetzung samt der geforderten Inhalte, der auszuweisenden Statistiken und der darzustellenden Ziele über die gesamte Abfallhierarchie findet sich in den §§ 30 bis 32 des KrWG festgehalten. Nach § 30 Absatz 1 Satz 1 KrWG erfolgt die Erstellung der Abfallbewirtschaftungspläne gebietsbezogen durch die Länder. Dabei sind sie angehalten ihre Abfallwirtschaftsplanung untereinander und aufeinander abzustimmen (§ 31 Absatz 1 Satz 1 KrWG) und die Öffentlichkeit durch die zuständige Behörde bei der Erstellung oder Änderung mit zu beteiligen (§ 32 Absatz 1 Satz 1 KrWG).

Wie ist nun aber konkret der Umgang mit Photovoltaikmodulen am Lebenszyklusende gesetzlich geregelt und welche Obliegenheiten gehen mit deren Inverkehrbringen einher?

5.1.2 WEEE2 und ElektroG2

Mit der Aufnahme von Photovoltaikmodulen in den Geltungsbereich der WEEE-Novelle und dementsprechend auch in den Bannkreis ihres nationalen Pendants werden sowohl die Produktverantwortung als auch der Umgang mit Altmodulen in den beiden entsprechenden Regelwerken konkretisiert. Auf europäischer Ebene war die Adaptierung der Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte durch die zahlreichen Änderungen, die mit der Novellierung der europäischen Abfallgesetzgebung mittels der Abfallrahmenrichtlinie einhergegangen sind, notwendig geworden. Die angepasste Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (im Folgenden mit WEEE2 abgekürzt) trat am 13. August 2012 in Kraft und ersetzte entsprechend die Richtlinie 2002/96/EG. Die WEEE2 soll ihren eigenen Erwägungsgründen folgend „[…] zur Nachhaltigkeit von Produktion und Verbrauch sowie zur effizienten Ressourcennutzung und zur Rückgewinnung von wertvollen Sekundärrohstoffen beitragen, indem vorrangig durch die Vermeidung von Abfällen von Elektro- und Elektronikgeräten und darüber hinaus durch Wiederverwendung, Recycling und andere Formen der Verwertung solcher Abfälle die zu beseitigende Abfallmenge reduziert wird. Sie soll ferner die Umweltschutzleistung aller in den Lebenszyklus von Elektro- und Elektronikgeräten einbezogenen Beteiligten, z. B. der Hersteller, der Vertreiber und der Verbraucher, und insbesondere der unmittelbar mit der Sammlung und Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten befassten Beteiligten verbessern.“ [Absatz 6 Satz 1 und 2 RL 2012/19/EU] Gleichwohl soll sie die Abfallrahmenrichtlinie ergänzen, wobei sie die Begriffsdefinitionen und die Abfallbewirtschaftungsverfahren aus der Abfallrahmenrichtlinie übernimmt. [Absatz 4 Satz 1 RL 2012/19/EU] In Anlehnung an die Vorgaben der Abfallrahmenrichtlinie soll die WEEE2 darüber hinaus nach Erwägungsgrund 12 mittels der Übernahme der Herstellerverantwortung die Produktion von Elektro(nik)geräten fördern, „[…] die ihre Reparatur, mögliche Nachrüstung, Wiederverwendung, Zerlegung und Recycling umfassend berücksichtigen und erleichtern.“ [Absatz 12 RL 2012/19/EU] Weiter ist nach Erwägungsgrund 14 und 23 der WEEE2 ebenfalls die getrennte Sammlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten zu fokussiert, wobei den Verbrauchern ein Anreiz zur Teilnahme gegeben, geeignete Rücknahmestrukturen geschaffen sowie die kostenlose Rückgabe für private Haushalte ermöglicht werden soll.

Zudem zielt die WEEE2 darauf ab, nach Erwägungsgrund:

- 19 eine wirksamere Versorgung der Union mit Rohstoffen ob dem „[…] Recycling wertvoller, in Elektro- und Elektronikgeräten enthaltener Ressourcen […]“ [Absatz 19 RL 2012/19/EU] sicherzustellen.
- 20 einen Anreiz für die Hersteller zur Nutzung rezyklierter Materialien bei der Produktion neuer Geräte zu schaffen.
- 23 zur Ermöglichung der kostenlosen Rückgabe von Elektro- und Elektronik-altgeräten durch private Haushalte den Herstellern die Finanzierung der „[…] Abholung von der Rücknahmestelle sowie die Behandlung, Verwertung und Beseitigung von Elektro- und Elektronik- Altgeräten […]“ [Absatz 23 RL 2012/19/EU] zu übertragen.

Was aber beinhaltet die angepasste Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte nun konkret und wie werden ihre Erwägungsgründe rechtlich umgesetzt; jeweils bezogen auf das Recycling von kristallinen Siliziumsolarmodulen?

Im zweiten Artikel der WEEE2 wird zuvörderst der Geltungsbereich der Richtlinie umrissen. Dabei werden sowohl zeitliche als auch weitere rechtliche und physische Bannkreise definiert. So unterteilt die Richtlinie zum einen ihren zeitlichen Geltungs-bereich in zwei Abschnitte: eine Übergangsfrist vom 13. August 2012 bis 14. August 2018 (Artikel 2 Absatz 1 Zeichen a der WEEE2) und den Bereich der uneingeschränkten Gültigkeit entsprechend ab dem 15. August 2018 (Artikel 2 Absatz 1 Zeichen b der WEEE2). Zum anderen wird im zweiten Absatz des zweiten Artikels der WEEE2 der unbeschadete Geltungsbereich im abfallrechtlichen Raum dargelegt, wobei explizit der Vorrang vor der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) aufgeführt ist. Der dritte Absatz desselben Artikels schränkt schließlich den physischen Bannkreis der WEEE2 ein, indem sowohl ähnlich der Abfallrahmenrichtlinie bestimmte, unter Artikel 2 Absatz 3 RL 2012/19/EU aufgeführte, Elektro- und Elektronikgeräte generell aus dem Geltungsbereich der Richtlinie ausgeschlossen werden, sowie ein weiterer Ausschluss von Elektro- und Elektronikgeräte ab dem Eintreten der uneingeschränkten Gültigkeit (Artikel 2 Absatz 4 WEEE2) festgelegt wird.

Entscheidend ist hierbei die Implementation von Photovoltaikmodulen, sowohl während der Übergangsfrist in die Kategorie 4 des Anhangs 2 der WEEE2, als auch während der uneingeschränkten Gültigkeit in die Kategorie 4 (Großgeräte)[115] des Anhangs 4 der WEEE2.

Im Artikel 3 der WEEE2 werden die richtlinienrelevanten Begrifflichkeiten legal definiert. Hierfür sind im zweiten Absatz des Artikels die Begriffsbestimmungen der Abfallrahmenrichtlinie aufgeführt, welche direkte Geltung in der WEEE2 erhalten; folglich deckungsgleich definiert sind. Darunter fallen zentrale Vokabeln wie beispielshalber die gesamten Bezeichnungen entlang der fünfstufigen Abfallhierarchie sowie die Begriffe „getrennte Sammlung“, „Vermeidung“ und „Behandlung“. Im ersten Absatz des dritten Artikels der WEEE2 werden zudem die richtlinienrelevanten Begriffsdefinitionen ausgeweitet auf Ausdrücke wie:

- Elektro- und Elektronikgeräte: bezeichnet „[…] Geräte, die zu ihrem ordnungsgemäßen Betrieb von elektrischen Strömen oder elektromagnetischen Feldern abhängig sind, und Geräte zur Erzeugung, Übertragung und Messung solcher Ströme und Felder, die für den Betrieb mit Wechselstrom von höchstens 1 000 Volt bzw. Gleichstrom von höchstens 1 500 Volt ausgelegt sind […].“ [Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe a der RL 2012/19/EU] Diese Begriffsbestimmung schließt das definierte und betrachtungsrelevante $gSSM_{sc/mc}$ mit ein, da solch ein Standardsolarmodul Gleichströme von weniger als 40 Volt erzeugt (vgl. Kapitel 4.5).
- Elektro- und Elektronik-Altgeräte: Elektro- und Elektronikgeräte die nach Definition in der Abfallrahmenrichtlinie die Eigenschaft des Abfalls besitzen. Dies schließt alle „[…] Bauteile, Unterbaugruppen und Verbrauchsmaterialien, die zum Zeitpunkt der Entledigung Teil des Produkts sind […]“ [Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe e der RL 2012/19/EU] mit ein.
- Elektro- und Elektronik-Altgeräte aus privaten Haushalten: sind Elektro- und Elektronik-Altgeräte (im Folgenden mit EEA abgekürzt), […] die aus privaten Haushalten stammen, und Elektro- und Elektronik-Altgeräte, die aus Gewerbe,

[115] Photovoltaikmodule, als Geräte zur Erzeugung elektrischer Ströme, werden zwar nach WEEE2 zusätzlich noch in die Kategorie 5 des Anhangs 4 mit aufgenommen, jedoch unter der Definitionseinschränkung: „Kleingeräte mit eingebauten Photovoltaikmodulen“ [Anhang 4 Nummer 5 WEEE2]. Kleingeräte, die in diese Kategorie fallen, dürfen per Definition keine äußere Abmessung von mehr als 50 cm besitzen. Durch die bereits erfolgte Definition und Betrachtungseinschränkung auf ein $gSSM_{sc/mc}$ sind Photovoltaikmodule dieser Kategorie nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit und werden dieserhalb nicht mitbetrachtet.

Industrie, Verwaltung und sonstigen Bereichen stammen und die aufgrund ihrer Beschaffenheit und Menge mit denen aus privaten Haushalten vergleichbar sind." [Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe h Satz 1 der RL 2012/19/EU] Als wesentlicher Punkt ist im zweiten Satz des gleichen Buchstaben zudem definiert, dass EEA, welche potenziell von privaten Haushalten und anderen Nutzern als private Haushalte verwendet wurden, grundsätzlich als Elektro- und Elektronik-Altgeräte aus privaten Haushalten einzustufen sind. Weiter sind Standardsolarmodule als EEA aus privaten Haushalten nach der Höhe der jeweiligen Stromerzeugung zuzuordnen [European Commission 2014]. Liefern sie Strom im Bereich der normalen Verfügbarkeit von privaten Haushalten oder operieren sie innerhalb der entsprechenden Spannungsbereiche, sind sie Bestandteil der Definition. Dies trifft für Standardsolarmodule (ausgenommen sind Großanlagen, welche speziell für die professionelle Nutzung ausgelegt wurden) zu, weshalb Altmodule nach der WEEE2 unter den Begriff der „Elektro- und Elektronik-Altgeräte aus privaten Haushalten" fallen [Wellens 2014].

Artikel 3 Absatz 1 der WEEE2 führt darüber hinaus aber noch weitere, zentrale Begriffsdefinitionen ein. Hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang die Bezeichnungen „Hersteller" (Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe f der RL 2012/19/EU), „Vertreiber" (Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe g der RL 2012/19/EU), „Bereitstellung auf dem Markt" (Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe j der RL 2012/19/EU) und „Inverkehrbringen" (Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe k der RL 2012/19/EU).

Der Begriff „Hersteller" ist nach Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe f der RL 2012/19/EU weit gefasst und in vier Kategorien unterteilt. Bezogen auf Photovoltaikmodule gelten demnach als „Hersteller" alle juristischen oder natürlichen Personen, die entweder:

- in einem Mitgliedsstaat der EU ansässig sind und Photovoltaikmodule eigens herstellen oder unter eigenem Namen / Warenzeichen entwerfen oder herstellen lassen und eigens im entsprechenden Hoheitsgebiet desselben Mitgliedsstaates vermarkten (Produzent), oder
- in einem Mitgliedsstaat der EU ansässig sind und in dessen Hoheitsgebiet Photovoltaikmodule unter eigenem Namen / Warenzeichen weiterverkaufen, sofern der Markenname des eigentlichen Produzenten nicht auf dem Modul erscheint (Vertriebshändler / Weiterverkäufer), oder

- in einem Mitgliedsstaat der EU ansässig sind und im selbigen Photovoltaikmodule aus einem anderen Mitgliedsstaat der EU oder aus einem Drittland gewerblich in Verkehr bringen (Importeur), oder
- Photovoltaikmodule in einem Mitgliedsstaat der EU mittels Fernkommunikationstechnik direkt vertreiben und nicht im selbigen Mitgliedsstaat ansässig sind (Internethändler / -verkäufer).

Hinzu kommt die Definition des Begriffs „Vertreiber“ nach (Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe g der RL 2012/19/EU), womit jede juristische oder natürliche Person entlang der gesamten Lieferkette gemeint ist, die Photovoltaikmodule auf dem Markt bereitstellt. Diese Definition impliziert, dass ein Vertreiber gleichfalls als Hersteller auftreten kann.

Eine weitere Unterscheidung trifft die WEEE2 zwischen „Inverkehrbringen“ und „Bereitstellung auf dem Markt“, wobei sich das Inverkehrbringen als Sonderform der Bereitstellung darbietet. „Inverkehrbringen“ ist nach Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe k der RL 2012/19/EU das erstmalige Bereitstellen eines Photovoltaikmoduls auf dem Markt eines EU-Mitgliedsstaates infolge einer Geschäftstätigkeit. „Bereitstellung auf dem Markt“ hingegen „[…] jede entgeltliche oder unentgeltliche Abgabe eines Produkts zum Vertrieb, Verbrauch oder zur Verwendung auf dem Markt eines Mitgliedstaats im Rahmen einer gewerblichen Tätigkeit“ [Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe j der RL 2012/19/EU]. Sonach werden wiederverwendete Photovoltaikmodule in der Regel bereitgestellt und nicht in den Verkehr gebracht [Nusser und Brüning 2012].

Artikel 4 der WEEE2 stellt allgemeine Anforderungen an die Produktkonzeption, wobei explizit auf die Vorgaben durch die Richtlinie 2009/125/EG (Ökodesignrichtlinie) verwiesen wird. Zudem sollen die Mitgliedsstaaten „[…] die Zusammenarbeit zwischen Herstellern und Betreibern von Recycling-Betrieben sowie Maßnahmen zur Förderung der Konzeption und Produktion von Elektro- und Elektronikgeräten, um insbesondere die Wiederverwendung, Demontage und Verwertung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten, ihren Bauteilen und Werkstoffen zu erleichtern […]“ [Artikel 4 Satz 1 RL 2012/19/EU], unterstützen.

Ein zentraler Punkt der WEEE2 findet sich im Artikel 5 und beinhaltet die Forderung an die Mitgliedsstaaten geeignete Maßnahmen zur Erreichung einer hohen Quote getrennt gesammelter EEA zu erlassen, um einen vorschriftsmäßige Behandlung aller gesammelten EEA zu bezwecken sowie deren Entsorgung über unsortierten Siedlungsabfall so gut wie möglich zu verhindern [Artikel 5 Absatz 1 RL 2012/19/EU]. Dies zielt neben verschiedenen EEA explizit auch auf die getrennte Sammlung von Photovoltaikmodulen ab. Für EEA aus privaten Haushalten (impliziert Photovoltaikmodule entsprechend der vorangegangenen Ausführungen) ist darüber hinaus sicherzustellen, dass den Endnutzern die Rückgabe ihrer Altgeräte kostenlos möglich ist. Dafür hat der jeweilige Mitgliedsstaat eine der Bevölkerungsdichte adäquate Anzahl an Rücknahmestellen zur Verfügung zu stellen [Artikel 5 Absatz 2 Buchstabe a RL 2012/19/EU]. Nach Artikel 5 Absatz 2 Buchstabe b der RL 2012/19/EU sollen die Vertreiber von Photovoltaikmodulen verpflichtet werden bei Abgabe eines neuen Produkts die Rücknahme von Geräten gleichwertiger Art und derselben Funktion kostenfrei anzubieten. Allerdings gibt die WEEE2 den Mitgliedsstaaten die Möglichkeit an die Hand, von dieser Regelung abzuweichen, sofern „[…] sie sicherstellen, dass die Rückgabe der Elektro- und Elektronik-Altgeräte für den Endnutzer hierdurch nicht erschwert wird, und dass sie für den Endnutzer weiterhin kostenlos ist.“ [Artikel 5 Absatz 2 Buchstabe b Satz 2 RL 2012/19/EU] Zudem erhalten die Mitgliedsstaaten Wahlrechte / Freiheitsgrade bei der Benennung der zur Rücknahme von EEA aus privaten Haushalten befugten Akteure (Artikel 5 Absatz 3 RL 2012/19/EU) und können laut Artikel 5 Absatz 4 RL 2012/19/EU beispielshalber Herstellern oder in deren Namen handelnde Dritte vorschreiben, die an den Rücknahmestellen gesammelten EEA zurückzunehmen. Die Mitgliedsstaaten sollen den Herstellern von Elektro- und Elektronikgeräten zusätzlich die Freiheit einräumen, „[…] individuelle und/oder kollektive Rücknahmesysteme für Elektro- und Elektronik-Altgeräte aus privaten Haushalten einzurichten und zu betreiben, sofern diese im Einklang mit den Zielen dieser Richtlinie stehen“ [Artikel 5 Absatz 2 Buchstabe d RL 2012/19/EU].

Im Falle von EEA nicht aus privaten Haushalten sind nach der Absatz 5 des fünften Artikels der WEEE2 immer die Hersteller oder in deren Namen handelnde Dritte zur Sammlung verpflichtet.

Ein weiterer zentraler Punkt der WEEE-Novelle ist die Vorgabe verbindlicher Mindestsammelquoten nach Artikel 7 der WEEE2. Mitgliedsstaaten der EU haben deren Einhaltung mittels der Implementation der Herstellerverantwortung zu gewährleisten. Die gegenwärtige Mindestsammelquote beträgt bis einschließlich dem 31. Dezember 2015 vier Kilogramm EEA aus privaten Haushalten je Einwohner je Jahr oder „[…] die gleiche Menge an Elektro- und Elektronik-Altgeräten nach Gewicht, wie in dem Mitgliedstaat durchschnittlich in den drei Vorjahren gesammelt wurde, je nachdem, welcher Wert der höhere ist.“ [Artikel 7 Absatz 1 Satz 5 RL 2012/19/EU] Beginnend mit dem Jahr 2016 wird dieser absolute Wert durch einen relativen ersetzt. So beträgt die jährliche Mindestquote zur Sammlung aller EEA (umfasst EEA aus privaten Haushalten und EEA von anderen Nutzern als private Haushalte) 45 Gew.-%, berechnet aus dem im betreffenden Jahr gesamt gesammelten Gewicht von EEA bezogen auf das durchschnittliche Gewicht der während der letzten drei Jahre in Verkehr gebrachten Elektro- und Elektronikgeräte innerhalb des Hoheitsgebietes eines Mitgliedsstaates. Diese Mindestsammelquote unterliegt einer stufenweisen Erhöhung bis auf 65 % im Jahre 2019. Ab 2019 haben die Mitgliedsstaaten die Wahl, an dieser Quote festzuhalten, „[…] oder alternativ dazu 85 % der auf dem Hoheitsgebiet dieses Mitgliedstaats anfallenden Elektro- und Elektronik-Altgeräten“ [Artikel 7 Absatz 1 Satz 4 RL 2012/19/EU] zu sammeln. Darüber hinaus steht es den einzelnen EU-Mitgliedsstaaten frei für die getrennte Sammlung von EEA ambitioniertere Quoten festzulegen. Zur Überprüfung der Sammelquoten müssen die Mitgliedsstaaten nach Artikel 7 Absatz 2 der RL 2012/19/EU Sorge tragen, dass ihnen mindestens Angaben über die von Rücknahmestellen, Behandlungsanlagen und von Vertreibern entgegengenommenen, sowie von Herstellern oder in deren Namen tätigen Dritten getrennt gesammelten EEA kostenfrei übermittelt werden.

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den Sammelquoten nach Artikel 7 Absatz 2 der RL 2012/19/EU nicht um individuelle Sammelquoten produktspezifischer Kategorien, sondern um eine generelle, für alle Elektro- und Elektronikgeräte im Bannkreis der RL 2012/19/EU gemeinsam geltende [European Commission 2014]. Jedoch ist nach Artikel 7 Absatz 6 der RL 2012/19/EU bis 14. August 2015 im Rahmen eines Berichts eine mögliche Einführung individueller Sammelquoten zu überprüfen, wobei explizit Photovoltaikmodule aufgeführt werden.

Der Umgang mit den getrennt gesammelten EEA ist in den Artikeln 8 und 11 der WEEE2 geregelt. Sonach sind die EEA zuvörderst nach Artikel 8 Absatz 1 der RL 2012/19/EU ordnungsgemäß zu behandeln. Diesbezüglich sind im Anhang VII der RL 2012/19/EU selektive Behandlungsschritte aufgeführt, wobei im Falle von kristallinen Silizium-solarmodulen einzig die Entfernung der externen elektrischen Leitungen eine Relevanz besitzt (Anhang VII Nummer 1 RL 2012/19/EU). Für die anschließende Verwertung im Sinne der Prioritätenfolge der definierten fünfstufigen Abfallhierarchie sollen „[…] die Hersteller oder in ihrem Namen tätige Dritte Systeme für die Verwertung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten einrichten und hierbei die besten verfügbaren Techniken einsetzen." [Artikel 8 Absatz 3 Satz 1 RL 2012/19/EU] Diese Systeme können sowohl individuelle als auch kollektive Lösungen umfassen. Die Zielvorgaben an die Verwertung sind schließlich im Artikel 11 der WEEE2 sowie in deren Anhang V aufgeführt. Für kristallinen Siliziumsolarmodule als Bestandteil der Gerätekategorie 4 sind dement-sprechend die in der Tabelle 5-1 zusammengefassten, zeitraumabhängigen Mindest-zielvorgaben für die Verwertung der betreffenden Kategorie einzuhalten.

Tabelle 5-1: Zusammengefasste und geordnete Übersicht der im Anhang V der RL 2012/19/EU aufgeführten Mindestzielvorgaben für die Verwertung jeweils der Gerätekategorie 4.

Mindestzielvorgaben nach RL 2012/19/EU		**Zeitraum nach Anhang V RL 2012/19/EU**		
	von	**13. August 2012**	**15. August 2015**	**ab 15. August 2018**
	bis	**14. August 2015**	**14. August 2018**	
Mindest-ziel	**Verwertungsquote**	75 %	80 %	85 %
	Recyclingquote	65 %	70 %	80 %

Gemäß Absatz 2 des elften Artikels der WEEE2 ergeben sich die prozentualen Werte der Tabelle 5-1 für die entsprechende Gerätekategorie 4 indem jeweils „[…] das Gewicht der Elektro- und Elektronik-Altgeräte, die […] der Verwertungs- oder Recyclinganlage/Anlage zur Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden, durch das Gewicht aller getrennt gesammelten Elektro- und Elektronik-Altgeräte dieser Gerätekategorie geteilt wird, ausgedrückt als prozentualer Anteil." [Artikel 11 Absatz 2 Satz 1 RL 2012/19/EU] Zur Überprüfung dieser Werte müssen die Hersteller oder in deren Namen handelnde Dritte „[…] das Gewicht der Elektro- und Elektronik-Altgeräte, ihrer Bauteile, Werkstoffe und Stoffe […], wenn diese die Rücknahmestelle verlassen (Output), Behandlungsanlagen zugeführt werden (Input) und diese verlassen (Output)

und der Verwertungs- oder Recyclinganlage / Anlage zur Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden (Input)“ [Artikel 11 Absatz 4 Satz 1 RL 2012/19/EU] dokumentieren. Darüber hinaus ist das Gewicht aller Erzeugnisse und Werkstoffe zu erfassen, die die Verwertungs- oder Recyclinganlage, beziehungsweise die Anlage zur Vorbereitung zur Wiederverwendung als Output verlassen. Gleichwohl müssen Hersteller oder Bevollmächtigte den in Anhang X der RL 2012/19/EU aufgeführten Registrierungs- und Berichterstattungsangaben nachkommen. Es ergeben sich für Hersteller oder in deren Namen handelnde Dritte folglich opulente Aufzeichnungs- und Berichtspflichten.

Neben diesen Dokumentationspflichten sind die Hersteller nach Artikel 12 der WEEE2 zur Finanzierung der Sammlung, Behandlung und Verwertung beziehungsweise umweltgerechten Beseitigung der, bei den zur Verfügung stehenden Rücknahmestellen abgegebenen, EEA aus privaten Haushalten verpflichtet. Zudem können die Mitgliedsstaaten die Hersteller auch verpflichten, etwaige Kosten zu tragen, die bei den Rückgabestellen durch die Sammlung von EEA aus privaten Haushalten entstehen. Allerdings ist bei den Finanzierungsvorschriften für EEA aus privaten Haushalten eine Unterscheidung bezüglich des Zeitpunktes des Inverkehrbringens des jeweiligen Produktes zu treffen. Für Photovoltaikmodule beispielshalber, die nach dem 13. August 2005 in Verkehr gebracht wurden, ist der Hersteller nach Artikel 12 Absatz 3 RL 2012/19/EU für die Finanzierung aller in diesem Absatz genannten Tätigkeiten, bezogen auf den anfallenden Abfall durch seine eigenen Produkte, verantwortlich. Er hat die Wahl dieser Verpflichtung selbst, oder durch Beteiligung an einem kollektiven System nachzukommen. Im Hinblick darauf müssen die Hersteller beim Inverkehrbringen eine Garantie stellen, woraus die Gewährleistung der Entsorgungsfinanzierung der EEA ersichtlich wird. Diese Garantie kann als Teilnahme in angemessenen EEA-Entsorgungsfinanzierungssystemen, in Form eines gesperrten Bankkontos oder durch eine Recyclingversicherung gestellt werden (Artikel 12 Absatz 3 Satz 5 RL 2012/19/EU). Bei Photovoltaikmodulen, die hingegen vor dem 13. August 2005 in Verkehr gebracht wurden (sogenannte „historische Altgeräte“), ist die Finanzierungsverpflichtung zur Entsorgung der Altmodule von einem oder mehreren Systemen zu tragen, „[…] zu dem bzw. denen alle Hersteller, die sich zum Zeitpunkt der Kostenentstehung am Markt befinden, anteilsmäßig beitragen, z. B. im Verhältnis zu ihrem jeweiligen Marktanteil für den betreffenden Gerätetyp.“ [Artikel 12 Absatz 4 RL 2012/19/EU]

Bei Altmodulen anderer Nutzer als private Haushalte, welche nach dem 13. August 2005 in Verkehr gebracht wurden, ist der Hersteller nach Artikel 13 der WEEE2 ebenfalls verpflichtet sämtliche Kosten für die Sammlung, Behandlung und Verwertung beziehungsweise umweltgerechten Beseitigung zu tragen. Handelt es sich indes um historische Altgeräte (Stichtag des Inverkehrbringens vor dem 13. August 2005) welche „[…] durch neue gleichwertige Produkte oder durch neue Produkte ersetzt werden, die dieselben Funktionen erfüllen, werden die Kosten von den Herstellern dieser Produkte finanziert, wenn sie diese liefern." [Artikel 13 Absatz 1 Satz 2 RL 2012/19/EU] Darüber hinaus können die Mitgliedsstaaten die Kosten auch auf die entsprechenden anderen Nutzer als private Haushalte partiell oder gänzlich umverteilen.

Artikel 16 der WEEE2 schreibt den Mitgliedsstaaten vor, ein nationales Herstellerregister einzuführen, mit dessen Hilfe jeder Hersteller den in Anhang X der RL 2012/19/EU aufgeführten Registrierungs- und Berichterstattungsangaben verpflichtend nachkommen kann. Auf Basis der einzelnen Herstellerregister wird die Einhaltung der gegebenen Anforderungen, die mit der WEEE2 einhergehen, überprüft. Dies beinhaltet eine jährliche Erhebung, „[…] einschließlich fundierter Schätzungen, über die Mengen und Kategorien von Elektro- und Elektronikgeräten, die auf ihren [betrifft den jeweiligen Mitgliedsstaat – Anm. d. Verf.] Märkten in Verkehr gebracht und in dem Mitgliedstaat über alle vorhandenen Wege gesammelt, zur Wiederverwendung vorbereitet, dem Recycling zugeführt und verwertet wurden, sowie über die ausgeführten getrennt gesammelten Elektro- und Elektronik-Altgeräte unter Angabe des Gewichts." [Artikel 16 Absatz 4 RL 2012/19/EU]

Die Verbringung von EEA zur Behandlung und Verwertung außerhalb der EU oder des betreffenden Mitgliedsstaates muss den Ausführungen und Anforderungen der Verordnungen (EG) Nr. 1013/2006 (Verordnung über die Verbringung von Abfällen) in Verbindung mit (EU) Nr. 660/2014 (Verordnung zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 über die Verbringung von Abfällen) sowie (EG) Nr. 1418/2007 (über die Ausfuhr von bestimmten in Anhang III oder IIIA der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates aufgeführten Abfällen, die zur Verwertung bestimmt sind, in bestimmte Staaten, für die der OECD-Beschluss über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung von Abfällen nicht gilt) Genüge tun.

Wenngleich die WEEE2 den Mitgliedsstaaten das Wahlrecht einräumt, Hersteller zur Ausweisung der Kosten der Sammlung, Behandlung und umweltgerechten Beseitigung gegenüber dem Käufer eines neuen Elektro- und Elektronikgerätes zu verpflichten [Artikel 14 Absatz 1 Satz 1 RL 2012/19/EU], müssen die Mitgliedsstaaten sicher stellen, dass in Verkehr gebrachte Elektro- und Elektronikgeräte von den Herstellern mit dem Symbol nach Anhang IX der WEEE2 gebührlich (sichtbar, erkennbar und dauerhaft) gekennzeichnet sind. Das Symbol (in nachstehender Abbildung 5-1 dargestellt) entspricht einer durchgestrichenen Abfalltonne auf Rädern und soll den Nutzern die Zufuhr zur getrennten Sammlung signalisieren. Hintergrund ist die nach Artikel 14 Absatz 4 der WEEE2 angestrebte Minimierung der Beseitigung von EEA als unsortierter Siedlungsabfall und die Vereinfachung deren getrennter Sammlung. Sollte das Produkt ob dessen Größe oder Funktion nicht kennzeichnungsfähig sein, „[…] ist das Symbol auf die Verpackung, die Gebrauchsanweisung und den Garantieschein für das Elektro- oder Elektronikgerät aufzudrucken.“ [Artikel 14 Absatz 4 Satz 2 RL 2012/19/EU]

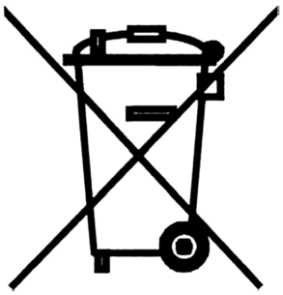


Abbildung 5-1: Symbol zur Kennzeichnung von Elektro- und Elektronikgeräten nach Anhang IX der RL 2012/19/EU.

Nach Artikel 14 Absatz 2 Buchstabe e der WEEE2 sind die Mitgliedsstaaten ebenfalls verpflichtet, dass den Nutzern von Elektro- und Elektronikgeräten privater Haushalte Informationen bezüglich der Bedeutung des in Abbildung 5-1 dargestellten Symbols bereitgestellt werden. Weiter müssen die Mitgliedsstaaten sicherstellen, dass die Hersteller Informationen über die verwendeten Bauteile, Werkstoffe und etwaige gefährliche Stoffe beziehungsweise Gemische den entsprechenden Entsorgungs-einrichtungen kostenlos bereitstellen, um „[…] die Vorbereitung zur Wiederverwendung sowie die korrekte und umweltgerechte Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten – einschließlich Wartung, Nachrüstung, Umrüstung und Recycling – zu erleichtern“ [Artikel 15 Absatz 1 Satz 1 RL 2012/19/EU].

Zusammenfassend ergeben sich mit der WEEE2 sonach folgende Pflichten für Hersteller von PV-Modulen:

- Registrierung des Herstellers beziehungsweise eines gesetzlichen Vertreters in allen nationalen Herstellerregistern vor Inverkehrbringen eines Photovoltaikmoduls, um legal im entsprechenden EU-Mitgliedsstaat einer Geschäftstätigkeit nachgehen zu können;
- Umfangreiche Dokumentations- und Berichtserstattungspflichten;
- Meldung der jährlich in Verkehr gebrachten Menge von PV-Modulen je Mitgliedsstaat im entsprechenden nationalen Herstellerregister;
- Finanzierung und Realisierung der Rücknahme und Entsorgung ihrer Altmodule;
- Information der Nutzer bezüglich der korrekten Entsorgung seiner Photovoltaikaltmodule;
- Kennzeichnung der Photovoltaikmodule mit dem Symbol der durchgestrichenen Mülltonne auf Rädern nach Anhang IX der WEEE2 und dem herstellerspezifischen Identifikationszeichens

und speziell Altmodule betreffen:

- Bereitstellung einer länderspezifischen Finanzierungsgarantie;
- Informierung der Entsorgungseinrichtungen über die stoffliche Zusammensetzung und die etwaige Verwendung gefährlicher Stoffe oder Gemische der Photovoltaikmodule;
- Erreichung verpflichtender zeitraumabhängiger Sammel- und Recyclingziele inklusive einer Berichtserstattung der entsorgten Altmodule.

Wenngleich die Mitgliedsstaaten nach Artikel 24 Absatz 1 der RL 2012/19/EU bis 14. Februar 2014 die WEEE2 in nationales Recht umzusetzen hatten, sind derweilen noch richtlinieninterne Mandate von der Kommission zu erfüllen. Dies betrifft (besonders mit Hinblick auf Photovoltaikmodule) zum einen den Erlass von Durchführungsrechtsakten zur Einführung einer Methode zur Berechnung der in einem Mitgliedsstaat in Verkehr gebrachten Menge von Elektro- und Elektronikgeräten und der in einem Mitgliedsstaat anfallenden EEA jeweils nach Gewicht, sowie der Möglichkeit zur Festsetzung gesonderter Sammelziele für beispielshalber Photovoltaikmodule auf Basis eines Berichtes; gemeinsam bis zum 14. August 2015. Zum anderen sind auf Grundlage eines Berichtes bis zum 14. August 2016 die Verwertungszielvorgaben an sich, sowie deren Berechnungsmethode zu überprüfen.

Der deutsche Gesetzgeber ist der Umsetzungsforderung nach Artikel 24 Absatz 1 der RL 2012/19/EU mittlerweile, wenn auch verspätet, nachgekommen. Im Juli 2015 passierte der deutsche Gesetzesentwurf zur Umsetzung der WEEE-Novelle den Bundestag und den Bundesrat und trat am 24. Oktober 2015 in Kraft. Das entsprechende Gesetz zur Neuordnung des Rechts über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG) mit dem 20. Oktober 2015 als Ausfertigungsdatum soll die Diskussionsbasis der nachfolgenden Betrachtungen bilden.[116] Aufgrund seines Charakters als Neufassung gegenüber dem ursprünglich am 16. März 2005 in Kraft getretenen Vorgängers wird die geltende und diskussionsrelevante Fassung des Gesetzes zur Neuordnung des Rechts über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten in der vorliegenden Arbeit im Folgenden mit ElektroG2 abgekürzt – nicht zuletzt um eine Verwechslung der beiden Gesetzestexte auszuschließen.

Grundlegend soll das Gesetz zur Neuordnung des Rechts über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten die national bestehenden und bewährten Strukturen zur Erfassung und Entsorgung von EEA sowie die bereits erreichten hohen nationalen Standards der Abfallwirtschaft erhalten und die neuen Vorgaben der WEEE2 möglichst ohne Abweichungen in das deutsche Rechtssystem integrieren [BMUB 2015]. Das ElektroG2 soll die Anforderungen an die Produktverantwortung nach § 23 des KrWG speziell für Elektro- und Elektronikgeräten konkretisieren und dieserhalb das Marktverhalten der Verpflichteten determinieren. Die abfallwirtschaftlichen Ziele des ElektroG2 decken sich sonach mit denen des KrWG und umfassen vornehmlich die Abfallvermeidung von Elektro- und Elektronikgeräten und Maßnahmen zur Reduktion der zu beseitigenden Abfallmengen aus Elektro- und Elektronikgeräten, wie die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling und der sonstigen Verwertung [§ 1 ElektroG2].

§ 2 des ElektroG legt den Anwendungsbereich des Gesetzes fest. Dieser gemahnt naturgemäß seinem europäischen Pendant, wobei die Begrifflichkeiten Anwendungsbereich und Geltungsbereich gleichbedeutend sind. Die Einteilung der Elektro- und

[116] An dieser Stelle wird explizit auf die Gültigkeit des Artikels 7 des Gesetzes verwiesen. Diskussionsbasis ist daher der Text inklusive des Artikels 2 des ElektroG2. Die damit einhergehenden Änderungen sind auf den ersten Blick nicht deutlich und im Artikel 1 des ElektroG2 nicht enthalten!

Elektronikgeräte in Kategorien nach § 2 Absatz 1 des ElektroG2, welche den Anwendungsbereich der nationalen Gesetzesnovelle definieren, ist in seiner Grobstruktur sinngemäß deckungsgleich gemäß der Einteilung in der WEEE2 bezüglich der definierten Übergangsfrist und dem offenen Anwendungsbereich. Lediglich die Feingliederung nach Anlage 1 des ElektroG2 stellt sich in beiden Fällen vereinzelt etwas umfangreicher dar. Der Ausschluss von Elektro- und Elektronikgeräten aus dem Anwendungsbereich des ElektroG2 deckt sich ebenfalls mit dem Vorgaben der WEEE2, jedoch in Form einer Gesamtliste; das ElektroG2 unterscheidet in diesem Zusammenhang nicht zwischen einer Übergangsfrist und einem offenen Anwendungsbereich, weshalb die beiden Listen nach Artikel 2 Absatz 3 und 4 der WEEE2 im ElektroG2 zusammengefasst vorliegen. Zudem verweist das ElektroG2 im § 2 Absatz 3 auf die übergeordnete Gültigkeit der Vorschriften aus dem KrWG und auf dessen Basis weiterer erlassener Rechtsverordnungen.

Bei den Begriffsbestimmungen nach § 3 des ElektroG2 finden sich indes einige Abweichungen zur WEEE2. Im Folgenden wird diesbezüglich nur auf prägnante Unterschiede und etwaige Neueinführungen vertieft eingegangen, die eine Relevanz für die Diskussion bezüglich Photovoltaikmodulen besitzen. Allgemein lässt sich festhalten, dass zentrale Begriffe wie beispielshalber Elektro- und Elektronikgeräte, Altgeräte, Altgeräte aus privaten Haushalten, Bereitstellung auf dem Markt und Inverkehrbringen sinngemäß übernommen wurden, wobei vereinzelt der Bezug ob der Gesetzesebene auf das KrWG und nicht auf die Abfallrahmenrichtlinie erfolgt. Gleichwohl findet sich die Einteilung des Begriffes „Hersteller“ im § 3 Nummer 9 des ElektroG2 teilweise sinngemäß übernommen. Einerseits werden die vier Ausprägungen der Herstellerdefinition inhaltsgleich eingeführt (betreffend: Produzent, Vertriebshändler / Weiterverkäufer, Importeur und Internethändler / -verkäufer), andererseits wird ein direkter Bezug der möglichen Gleichsetzung eines Vertreibers mit einem Hersteller geschaffen[117]. Zudem wird noch innerhalb derselben Nummer (§ 3 Nummer 9 ElektroG2 Begriffsdefinition: Hersteller) eine Regelung angeführt, dass eine vorsätzliche oder fahrlässige Bereitstellung von Photovoltaikmodulen fehlerhaft oder nicht ordnungsgemäß registrierter Hersteller auf dem Markt einem Inverkehrbringen gleichzusetzen ist.

[117] Dieser Pasus nimmt Vertreiber von Photovoltaikmodulen in die Pflicht, die ordnungsgemäße Registrierung des Herstellers oder dessen Bevollmächtigten sicherzustellen.

Zwar wird im Gegensatz zur WEEE2 der Begriff des Bevollmächtigten in der Liste der Begriffsdefinitionen im § 3 Nummer 10 des ElektroG2 direkt eingeführt, jedoch in Anlehnung an die Forderungen des Artikels 17 der WEEE2. Demnach ist ein Bevollmächtigter jede natürliche oder juristische Person „[…] oder Personengesellschaft, die ein Hersteller ohne Niederlassung im Geltungsbereich dieses Gesetzes beauftragt hat, in eigenem Namen sämtliche Aufgaben wahrzunehmen, um die Herstellerpflichten nach diesem Gesetz zu erfüllen […]“ [§ 3 Nummer 10 ElektroG2].

Neu hingegen sind beispielshalber die Definitionen von Begriffen wie Geräteart und historischen Altgeräten. Die Bezeichnung Geräteart nach § 3 Nummer 2 ElektroG2 fasst Geräte einer Kategorie zusammen, die analoge Funktionsmerkmale gebieten. Wesentlich gewichtiger im Hinblick auf Photovoltaikmodule ist hingegen die Definition „historische Altgeräte“ im § 3 Nummer 4 Buchstabe b ElektroG2, wonach Photovoltaikmodule, denen die Abfalleigenschaft nach § 3 Absatz 1 KrWG obliegt und die vor dem Inkrafttreten des ElektroG2 (24. Oktober 2015) in Verkehr gebracht wurden, als historische Altgeräte gelten. Für andere Altgeräte (außer Leuchten) gilt mit dem 13. August 2005 der gleiche Stichtag für das Inverkehrbringen wie bereits im Artikel 12 Absatz 4 der WEEE2 festgelegt.[118]

Neben den Begriffen Bereitstellen auf dem Markt und Inverkehrbringen wird im ElektroG2 noch der Ausdruck „Anbieten“ eingeführt, welcher ein gezieltes Präsentieren von Elektro- und Elektronikgeräten zur Realisierung eines Kaufvertrages beschreibt. Als gesetzesspezifische Erweiterungen zum KrWG sind im Gegensatz zur WEEE2 ebenfalls die Begrifflichkeiten Erfassung, Behandlung, Erstbehandlung, Entfernen und gefährliche Stoffe oder gefährliche Gemische mit in den § 3 des ElektroG2 aufgenommen. Erfassung beschreibt sonach die Rücknahme und die Sammlung von Altgeräten. Behandlung fasst alle Tätigkeiten zusammen, „[…] die nach der Übergabe von Altgeräten an eine Anlage zur Entfrachtung von Schadstoffen, zur Demontage, zum Schreddern, zur Verwertung oder zur Vorbereitung der Beseitigung durchgeführt werden, sowie sonstige Tätigkeiten, die der Verwertung oder Beseitigung der Altgeräte dienen“ [§ 3 Nummer 23 ElektroG2]. Eine Erstbehandlung hingegen beschreibt die tatsächlich erste Behandlung von EEA, welche mit dem Hintergrund der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder zur Entfrachtung von Schadstoffen sowie der Separierung von Wertstoffen inklusive etwaiger

[118] An dieser Stelle wird auf die Änderungen ab 15. August 2018 ob des Inkrafttretens des dritten Artikels des ElektroG2 hingewiesen.

Vorbereitungshandlungen erfolgen. Entfernen nach § 3 Nummer 25 des ElektroG2 meint nicht etwa das Entfernen von EEA vom Markt, es bezieht sich indes auf „[…] die manuelle, mechanische, chemische oder metallurgische Bearbeitung von Altgeräten, in deren Folge im Laufe des Behandlungsverfahrens gefährliche Stoffe, Gemische oder Bestandteile einen unterscheidbaren Stoffstrom oder einen unterscheidbaren Teil eines Stoffstromes bilden […]“ [§ 3 Nummer 25 ElektroG2].

Hervorzuheben ist zudem die explizite Aufnahme des Begriffes Photovoltaikmodule in die Begriffsbestimmungen des ElektroG2 und damit einhergehende deren Legaldefinition im Anwendungsbereich der Gesetzesnovelle. Nach § 3 Nummer 13 des ElektroG2 sind Photovoltaikmodule „[…] elektrische Vorrichtungen, die zur Verwendung in einem System bestimmt sind und zur Erzeugung von Strom aus solarer Strahlungsenergie entworfen, zusammengesetzt und installiert werden“ [§ 3 Nummer 13 ElektroG2].

Als letzter Unterschied zur WEEE2 enthält das ElektroG2 im § 3 Nummer 12 noch die Definition des Begriffes öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger (nachstehend mit örE abgekürzt), welcher jene juristische Person beschreibt, die nach Landesrecht zur Entsorgung verpflichtet ist.

Hersteller von Photovoltaikmodulen unterliegen nach dem ElektroG2 schon bei / vor dem Inverkehrbringen ihrer Produkte auf dem nationalen Markt mehreren Pflichten, welche im zweiten Abschnitt des ElektroG2, in den §§ 4 – 9, festgehalten sind und teilweise in späteren Paragraphen konkretisiert werden. Nach § 4 Absatz 1 des ElektroG2, welcher sich sinngemäß deckungsgleich mit der Produktkonzeption nach Artikel 4 der WEEE2 darstellt, müssen Hersteller beispielshalber ihre Elektro- und Elektronikgeräte mit Blick auf eine erleichterte Demontage, Wiederverwendung und Verwertung von Altgeräten entwerfen.[119] Verglichen zur WEEE2 wird zusätzlich im zweiten Satz des § 4 Absatz 1 des ElektroG2 die Konstruktionsbedingung der problemlosen Entnahmefähigkeit von Batterien und Akkumulatoren eingeführt, welche jedoch in den Abschnitten 2 und 3 des § 4 des ElektroG2 sogleich wieder kohibiert wird.

[119] § 4 Absatz 1 Satz 1 des ElektroG2 steht sonach im Widerspruch zu den bereits beschriebenen Fertigungsschritten eines $gSSM_{sc/mc}$ ob dessen geforderter universellen Einsetzbarkeit und der so benötigten Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse jedweder Art (vgl. Kap. 4.5.1.1). Besonders kritisch sind in diesem Zusammenhang die vorgegebenen Prozessparameter des gegenwärtig genutzten Laminierungsschrittes und der direkten Einbettung der Zellen sowie die Vernetzung des gesamten Verbundes inklusive des Frontglases. Weiterführende und vertiefende Diskussionen diesbezüglich finden sich im Kapitel 5.5.

Nach § 6 Absatz 1 des ElektroG2 müssen sich Hersteller von Elektro- oder Elektronikgeräten beziehungsweise deren Bevollmächtigte vor dem Inverkehrbringen ihrer Produkte auf dem nationalen Markt bei der zuständigen Behörde mit Auskunft zur Marke und der Geräteart registrieren.[120] Die Registrierung umfasst dabei alle in Anlage 2 des ElektroG2 aufgeführten notwendigen Angaben, wie etwa Name und Anschrift, nationale Kennnummer, Gerätekategorie, Geräteart, verwendete Verkaufsmethode et cetera. Gleichwohl sind Hersteller oder ihre Bevollmächtigten nach § 6 Absatz 1 Satz 4 des ElektroG2 verpflichtet etwaige Veränderungen von Daten des ursprünglichen Registrierungsantrages mitzuteilen.[121] Die zuständige Behörde ist nach § 36 des ElektroG2 das Umweltbundesamt, dessen Aufgaben und Pflichten im Zusammenhang mit der Registrierung von Herstellern oder deren Bevollmächtigten in den §§ 37 und 38 des ElektroG2 konkretisiert werden. Unter anderem ist die zuständige Behörde angehalten, die bei ihr registrierten Hersteller / Bevollmächtigten der Gemeinsamen Stelle zu übermitteln. Die Gemeinsame Stelle wiederum ist nach § 5 Absatz 1 des ElektroG2 durch die Hersteller oder deren Bevollmächtigten einzurichten. Dies ist auf nationaler Ebene in Form der „stiftung elektro-altgeräte register“ (nachstehend mit stiftung ear abgekürzt) erfolgt, womit der deutsche Gesetzgeber den Forderungen aus Artikel 16 der WEEE2 nachkommt. Die Gemeinsame Stelle stiftung ear besitzt nach dem ElektroG2 umfangreiche Aufgaben, Pflichten und Befugnisse, welche in den §§ 31 bis 35 des ElektroG2 festgehalten sind. Von der detaillierten Diskussion der betreffen Paragraphen wird an dieser Stelle abgesehen, da dies nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist. Es wird jedoch an entsprechenden Stellen, wenn eine Relevanz zur Thematik des Recyclings von Photovoltaikmodulen gegeben ist, vereinzelt auf die Obliegenheiten der stiftung ear eingegangen.

Neben den Vorschriften zur Produktkonzeption und der Registrierung fallen den Herstellern von beispielshalber Photovoltaikmodulen vor dem Inverkehrbringen ihrer Produkte ob der Einstufung von Photovoltaikmodulen als sogenannte Elektro- und Elektronikgeräte zur Verwendung in privaten Haushalten noch weitere Pflichten zu; die Pflicht zur Finanzierungsgarantiestellung und eine Kennzeichnungspflicht der Produkte. Zur Erfüllung der Finanzierungsgarantiestellung nach § 7 Absatz 1 des ElektroG2 ist Herstellern von Photovoltaikmodulen oder deren Bevollmächtigten auferlegt, dem

[120] Nach § 6 Absatz 2 Satz 2 des ElektroG2 dürfen zudem Vertreiber keine Elektro- und Elektronikgeräte von nicht vorschriftsgemäß registrierten Hersteller oder Bevollmächtigten in den Verkehr bringen.

[121] Zuwiderhandlungen können nach § 45 Absätze 1 und 2 des ElektroG2 mit Geldbußen bis 100.000 € geahndet werden.

Umweltbundesamt als zuständige Behörde „[…] kalenderjährlich eine insolvenzsichere Garantie für die Finanzierung der Rücknahme und Entsorgung der Elektro- und Elektronikgeräte nachzuweisen, die der Hersteller nach dem 13. August 2005 [ergo exklusive historischer Altgeräte – Anm. d. Verf.] im Geltungsbereich dieses Gesetzes in Verkehr bringt oder gebracht hat und die in privaten Haushalten genutzt werden können." [§ 7 Absatz 1 Satz 1 ElektroG2] Nach Absatz 2 desselben Paragraphen kann die Finanzierungsgarantiestellung in Form einer individuellen oder eine kollektiven Garantie erfolgen. Individuelle Garantien können als Bürgschaft oder Garantie auf erstes Anfordern eines Kreditinstituts oder -versicherers sowie durch „[…] Hinterlegung von Geld zur Sicherheitsleistung im Sinne von § 232 Absatz 1 des Bürgerlichen Gesetzbuchs […]" [§ 7 Absatz 2 Nummer 3 ElektroG2] gestellt werden. Eine kollektive Finanzierungsgarantie kann hingegen in Form der Teilnahme an Garantiesystemen erfolgen, welche vorbehaltlich einer Eignungsprüfung durch das Umweltbundesamt nach § 37 Absatz 6 des ElektroG2 zur Finanzierung der Entsorgung von EEA zweckerfüllend ist. Jedweder dieser finanziellen Garantiestellungen soll sonach ebenfalls die Entsorgungsaufwände aller Hersteller, die im Momentum der Altgeräterückgabe vom Markt ausgeschieden sind, mit abdecken. Im Sinn der Kennzeichnungspflicht nach § 9 Absatz 1 des ElektroG2 sind Elektro- oder Elektronikgeräte, denen nicht die Eigenschaft eines historischen Altgerätes innewohnt, vor dem Inverkehrbringen so zu kennzeichnen, dass sowohl der Hersteller eindeutig identifiziert werden kann, als auch dass die Absenz der Eigenschaft eines historischen Altgerätes erkennbar vorliegt. Absatz 2 des § 9 des ElektroG2 schreibt analog den Vorgaben aus dem Artikel 14 Absatz 4 der WEEE2 vor, dass Geräte dauerhaft mit dem Symbol der durchgestrichenen Abfalltonne (Anlage 3 des ElektroG2 / Anhang IX der WEEE2) zu kennzeichnen sind und gegebenenfalls, bei unzureichender Größe des Elektro- oder Elektronikgerätes, beziehungsweise bei möglicher technischer Beeinträchtigungen infolge der Geräte-kennzeichnung, das Symbol stattdessen auf der Verpackung, der Gebrauchsanweisung oder dem Garantieschein abzubilden ist.

Nach dem Inverkehrbringen und der Nutzungsphase der Elektro- und Elektronikgeräte, sobald ihnen die Eigenschaft des Abfalls zuzuschreiben ist, greifen für die verschiedenen Akteure weitere Verpflichtungen nach dem ElektroG2. So sind EEA seitens der Besitzer „[…] einer vom unsortierten Siedlungsabfall getrennten Erfassung zuzuführen." [§ 10 Absatz 1 Satz 1 ElektroG2] Dabei gelten die gleichen absoluten und zeitraumabhängigen

relativen Mindesterfassungsquoten wie bereits im Artikel 7 Absatz 1 der WEEE2 festgehalten. Zwar ist die Erfassung von EEA aus privaten Haushalten nur örE, Vertreibern und Herstellern gestattet, so dürfen jene für den Erfassungsvorgang aber auch Dritte beauftragen. Um den Forderungen des Artikels 5 Absatz 2 Buchstabe a der WEEE2 nachzukommen, haben die örE nach § 13 Absätze 1, 3 und 4 des ElektroG2 in Abhängigkeit der jeweiligen Bevölkerungsdichte genügend Sammelstellen zur Sammlung der EEA aus privaten Haushalten einzurichten, sodass private Haushalte ihre EEA kostenfrei abgeben können. Über dieses Bringsystem hinaus können die örE zusätzlich parallel ein Holsystem anbieten. Wird eine Abgabe von mehr als 20 Altmodulen beabsichtigt, so sind nach Absatz 5 selbigen Paragraphen vorab der Anlieferungsort und der Zeitpunkt mit dem örE abzugleichen. Die örE stellen die erfassten EEA den Herstellern oder deren Bevollmächtigten zur Abholung an von ihnen eingerichteten Übergabestellen in geeigneten Behältnissen bereit. Hierfür werden die EEA nach § 14 Absatz 1 des ElektroG2 in sechs Sammelgruppen unterteilt, wobei Photovoltaikmodulen eigens eine Gruppe (Sammelgruppe 6) zugeschrieben ist.[122] Die Behältnisse zur Bereitstellung zur Abholung sind nach § 15 Absatz 1 Satz 1 des ElektroG2 kostenfrei durch die Hersteller oder deren Bevollmächtigten aufzustellen und müssen sich zur bruchsicheren Sammlung von beispielshalber Photovoltaikmodulen eignen; vorbehaltlich der Optierung nach § 14 Absatz 5 Satz 1 des ElektroG2. Im Falle von Photovoltaikmodulen hat der örE der Gemeinsamen Stelle die zur Abholung bereitstehenden und befüllten Behältnisse ab einer Abholmenge von mindestens 2,5 m³ zu melden. Die stiftung ear berechnet sodann nach § 31 Absatz 5 des ElektroG2 mittels der Registerdatenbank den Anteil der Altmodule, die durch die Hersteller bei den Übergabestellen der örE abzuholen sind und meldet dies der zuständigen Behörde. Jene beauftragt daraufhin verpflichtend entsprechende Hersteller mit der unverzüglichen Abholung der bereitgestellten und befüllten Behältnisse. Der beauftragte Hersteller oder dessen Bevollmächtigter ist zudem nach § 16 Absätze 3 und 4 des ElektroG2 verpflichtet, umgehend leere Behältnisse wieder zur Verfügung zu stellen und die Kosten für die Abholung, der nachfolgenden Entsorgung und für das Aufstellen der Tauschbehältnisse zu tragen. Zudem ist er verpflichtet, die abgeholten Altmodule wiederzuverwenden oder zu behandeln (schließt die Erstbehandlung mit ein) und im Sinne der Abfallhierarchie zu entsorgen. Gleichwohl können Hersteller von beispielshalber Photovoltaikmodulen oder

[122] Gilt sowohl während des geschlossenen als auch während des offenen Anwendungsbereiches ab 15. August 2018.

deren Bevollmächtigte, wie bereits im Artikel 5 Absatz 2 Buchstabe d der WEEE2 gefordert, „[…] freiwillig individuelle oder kollektive Rücknahmesysteme für die unentgeltliche Rückgabe von Altgeräten aus privaten Haushalten einrichten und betreiben, sofern diese Systeme im Einklang mit den Zielen nach § 1 stehen." [§ 16 Absatz 5 Satz 1 ElektroG2] Die hierfür notwendigen Rücknahmestellen müssen jedoch separiert von den Sammel- und Übergabestellen der örE betrieben werden.

Neben den Obliegenheiten der örE und der Hersteller bezüglich der Erfassung von Altmodulen werden nach dem ElektroG2 auch Vertreiber mit einer Verkaufsfläche ab 400 m² in die Pflicht genommen. In Anlehnung an Artikel 5 Absatz 2 Buchstaben b und c der WEEE2 sind nach § 17 Absatz 1 des ElektroG2 Vertreiber mit der benannten Mindestverkaufsfläche verpflichtet, EEA von Endnutzern unentgeltlich zurückzunehmen, sofern diese ein neues Elektro- oder Elektronikgerät derselben Geräteart mit gleichartiger Funktion erwerben, oder die Altgeräte äußere Abmessungen von maximal 25 cm besitzen (in diesem Fall darf die Rücknahme nicht vom Kauf eines neuen Gerätes abhängig sein). Darüber hinaus können Vertreiber EEA auch freiwillig zurücknehmen. Die kostenfreie Rückgabemöglichkeit von EEA bei Vertreibern muss für den Endnutzer am Ort der Abgabe oder in unmittelbarer Nähe dazu möglich sein. Der Ort der Abgabe kann infolge der Auslieferung der Elektro- oder Elektronikgeräte auch der private Haushalt selbst darstellen. Nutzt ein Vertreiber Fernkommunikationsmittel zum Verkauf von Elektro- und Elektronikgeräten, muss dieser nach § 17 Absatz 2 des ElektroG2 ebenfalls die kostenfreie Rücknahme von privaten EEA sicherstellen, indem er eine geeignete Rückgabemöglichkeit in zumutbarer Entfernung des Käufers anbietet oder die Abholung der EEA beim Kunden vor Ort organisiert; sofern seine gesamten Lager- und Versandflächen für Elektro- und Elektronikgeräte die Mindestgröße von 400 m² überschreiten. Analog der Bestimmungen bezüglich der kollektiven Rücknahmesysteme seitens der Hersteller und der dafür einzurichtenden Rücknahmestellen ist Vertreibern nach § 17 Absatz 4 des ElektroG2 die Nutzung von Sammel- und Übergabestellen der örE zur Erfüllung ihrer Rücknahmepflicht untersagt. Werden nach der Erfassung der EEA seitens der Vertreiber die Altgeräte nicht an die Hersteller, deren Bevollmächtigte oder die örE übergeben, sind die Vertreiber selbst zur Wiederverwendung oder Behandlung und Entsorgung der EEA verpflichtet.

Abweichend von den soeben diskutierten Pflichten und Bestimmung zur Erfassung von EEA aus privaten Haushalten können örE unter gewissen Voraussetzungen sämtliche Altgeräte einer Sammelgruppe nicht zur Abholung bereitstellen; sie aus der stiftung ear-Abholkoordination ausnehmen. Dieser als Optierung bezeichnete Vorgang unterliegt mit der Novelle des ElektroG verschärften Auflagen. So muss vom entsprechenden örE nach § 25 Absatz 1 Satz 3 des ElektroG2 sechs Monate vor Beginn der Optierungsabsicht diese der zuständigen Behörde angezeigt werden und ist nach § 14 Absatz 5 Satz 1 des ElektroG2 für alle optierten Altgeräte mindestens zwei Jahre bindend. Zwar hat der optierenden örE die Altgeräte analog der Verpflichtungen der Hersteller in Eigenregie wiederzuverwenden oder zu behandeln und zu entsorgen, kann diese oder die gewonnenen Sekundärprodukte jedoch anschließend eigens vermarkten. Des Weiteren unterliegen örE, die Altgeräte optieren, den in § 26 Absatz 1 des ElektroG2 aufgeführten monatlichen und jährlichen Mitteilungspflichten gegenüber der stiftung ear. Diese sind, soweit möglich, in Form von Gewichtsangaben zu machen und umfassen beispielshalber die jährlich zur Wiederverwendung vorbereiteten und recycelten, die verwerteten, die beseitigten und die ausgeführten Altgeräte. Zudem sind nach ElektroG2 und der zur Gesetzesnovelle gehörenden Überarbeitung der Elektro- und Elektronikgerätegesetz-Gebührenverordnung (kurz: ElektroGGebV) die optierenden örE gegenüber der stiftung ear gebührenpflichtig.

Altmodule, die als Altgeräte anderer Nutzer als private Haushalte gelten, da beispielshalber ihre anfallende Menge des betreffenden Endnutzers nicht mit den usuell in privaten Haushalten anfallenden Mengen vergleichbar ist (wie bei gewerblichen Solarfeldern der Fall), sind durch den entsprechenden Hersteller oder seinen Bevollmächtigten nach § 19 Absatz 1 Satz 1 des ElektroG2 für den Endnutzer zumutbar zu erfassen und anschließend zu entsorgen. Historische Altgeräte (Altmodule, die vor Inkrafttreten der Gesetzesnovelle in den Verkehr gebracht wurden) sind jedoch explizit aus dieser Regelung ausgenommen. Wenngleich in diesem Fall der Besitzer zur Entsorgung verpflichtet ist, kann er aber auch abweichende Vereinbarungen mit dem jeweiligen Hersteller treffen.

Im Anschluss an die Rücknahme von EEA ist der jeweilige Entsorgungspflichtige verpflichtet die Altgeräte wiederzuverwenden oder zu behandeln und zu entsorgen. Die entsprechenden Vorschriften sind im Abschnitt 4 des ElektroG2 in den §§ 20 bis 24 festgehalten. Sonach ist zuvörderst zu prüfen, ob die EEA beziehungsweise einzelne Bauteile für eine Vorbereitung zur Wiederverwendung geeignet sind; jedoch nur im Rahmen der technischen und wirtschaftlichen Zumutbarkeit. Ist dies nicht der Fall, sind die EEA einer Erstbehandlung[123] zu unterziehen, wobei sowohl alle Flüssigkeiten zu entfernen sind, als auch die in Anlage 4 des ElektroG2 aufgeführten Anforderungen an die selektive Behandlung eingehalten werden müssen. Diesbezüglich sind Photovoltaikmodulen, als getrennt erfasste Altgeräte, nach Anlage 4 Nummer 1 Buchstabe k des ElektroG2 die externen elektrischen Leitungen im Zuge der Erstbehandlung zu entfernen. Jene elektrischen Leitungen müssen wiederum gemäß den Grundpflichten der Abfallbeseitigung nach § 15 Absatz 2 des KrWG verwertet oder beseitigt werden. Sowohl die Erstbehandlung als auch die etwaigen konsekutiven Behandlungsschritte müssen im Sinne des § 3 Absatz 28 des KrWG nach dem Stand der Technik erfolgen. Weiter unterbindet Absatz 4 des § 20 des ElektroG2 eine Beseitigung von EEA, sofern die Eignungsprüfung zur Vorbereitung zur Wiederverwendung sowie eine Erstbehandlung nicht erfolgten.

Für erstbehandelte kristalline Siliziumsolarmodule gelten nach § 22 Absatz 1 Nummer 2 des ElektroG2 anschließend die bereits im Anhang V der WEEE2 für den Zeitraum zwischen dem 15. August 2015 und dem 14. August 2018 festgelegten Mindestzielvorgaben (vergleich Tabelle 5-1, Seite 343). Sonach sind im geschlossenen Anwendungsbereich des ElektroG2 mindestens 80 % zu verwerten und mindestens 70 % der Vorbereitung zur Wiederverwertung und dem Recycling zuzuführen. Ab 15. August 2018 mit Eintreten des offenen Anwendungsbereiches des ElektroG2 sind mindestens 85 % der Photovoltaikmodule zu verwerten und mindestens 80 % der Vorbereitung zur Wiederverwertung und dem Recycling zuzuführen. Die Erhöhung dieser Mindestquoten mit Anbeginn des offenen Anwendungsbereiches ist das Resultat der Neuordnung der Geräteklassen nach Artikel 3 Nummer 1 und Nummer 11 in Verbindung mit der Umgestaltung des § 22 Absatz 1 nach Artikel 3 Nummer 7 Buchstabe a des ElektroG2.

[123] Die Erstbehandlung von EEA darf indes alleinig in eigens zertifizierten Erstbehandlungsanlagen durchgeführt werden. Die Anforderungen und die Verpflichtungen im Zusammenhang mit der Zertifizierung einer Erstbehandlungsanlage finden sich sämtlich im § 21 des ElektroG2, inklusiver entsprechender Verweise auf die jeweiligen anzuwendenden Gesetzestexte, geregelt.

Berechnet werden diese Quoten nach den Vorgaben des § 22 Absatz 2 des ElektroG2, welcher sinngemäß den Ausführungen des Artikels 11 Absatz 2 der WEEE2 entspricht. Grundlage bilden die Angaben zum Gewicht der Altgeräte einer Gerätekategorie, die einer Verwertungsanlage zugeführt werden sowie das Gesamtgewicht aller kategorieintern getrennt erfassten EEA; die Quoten ergeben sich sonach je Kategorie und nicht je Geräteart.

Wenngleich die geforderten Mindestquoten des ElektroG2 denen der WEEE2 sowohl für den geschlossenen als auch für den offenen Anwendungsbereich ab 15. August 2018 entsprechen, sind sie hinsichtlich eines ökologisch sinnvollen Recyclings von Altmodulen zu niedrig angesetzt. Selbst wenn es sich dabei um individuelle Quoten handeln würde und der offenen Anwendungsbereich zugrunde gelegt wird, wären diese Mindestquoten ob der stoffspezifischen Massenanteile in beispielshalber einem $gSSM_{sc/mc}$ kritisch zu betrachten. Wie Tabelle 4-28 auf Seite 290 im Kapitel 4.5.6.1: „Stoffliche Zusammensetzung des definierten Standardsolarmoduls“ zu entnehmen ist, würden bereits die Entfernung des Frontglases und des Aluminiumrahmens zur Erfüllung dieser vorgegebenen Recyclingmindestquoten ausreichen; zumindest innerhalb der relevanten Geräteart. Sonach werden zwar die enthaltenen Massenwerkstoffe, nicht aber die Funktionsmaterialien ausreichend erfasst. Mittels diesen mengenbasierten Behandlungsquoten verfehlt der Gesetzgeber die Möglichkeit einen außermonetären Anreiz zum Recycling der bereits hervorgehobenen Rohstoffe wie Bismut, Silber et cetera und des in seiner Herstellung und Raffination energieintensiven hochreinen Siliziums zu setzen. Das Recycling von Photovoltaikmodulen würde sonach, bei reiner Mindesterfüllung der gesetzlichen Vorgaben, keinen Beitrag zur Senkung von Importabhängigkeiten bei den Funktionsmaterialien leisten und strukturellen Versorgungsengpässen nicht entgegenwirken können, sowie etwaige weitere positive Effekte durch die Implementation von Sekundärrohstoffen in die Produktion neuer Solarmodule auslassen.

Im Gegensatz dazu sehen viele Photovoltaikmodulproduzenten nach [Auer 2015] und [Pankrath 2014] ein Recycling von Photovoltaikmodulen und dessen Funktionsmaterialien als sinnvoll an. Laut den Ergebnissen von [Auer 2015] beschreiben viele Hersteller darüber hinaus ein Recycling von Altmodulen als ökologisch notwendig, wobei sie die Behandlung der erfassten Altmodule spezialisierten Recyclingunternehmen zusprechen, anstatt die entsprechenden Maßnahmen in den eigenen Produktionsstandorten durchzuführen. Gleichwohl scheint ein Gros der Hersteller einer recyclingorientierten Produktion in Verbindung mit der nach § 4 Absatz 1 des ElektroG2 geforderten Produktkonzeption offen gegenüber zu stehen oder bewerten dies positiv. Etwaige Ansätze, mögliche Wechselwirkungen zwischen recyclingorientierter Produktkonzeption und Wirkungsgradeinbußen sowie vertiefende Betrachtungen zu Designvariablen liefert diesbezüglich Kapitel 5.5 ab Seite 611.

Wenngleich eine Notwendigkeit des Recyclings von Photovoltaikmodulen im Zuge der, wenn auch für ein ökologisch sinnvolles Recycling zu geringen, nationalen gesetzlichen Vorgaben besteht, sehen verschiedene Hersteller einen Zugewinn infolge eines Photovoltaikmodulrecyclings ob der Wiederverwendung von Materialien und damit einhergehend einer Reduktion der benötigten Rohstoffe, einem verbesserten Firmenimage sowie einer möglichen Reduktion der Beschaffungskosten bei den energieintensiven Rohmaterialien wie beispielshalber dem hochreinen SGS_p. [Auer 2015 und Pankrath 2014]

Nebst den bereits aufgeführten Obliegenheiten der verschiedenen Akteure vor / beim Inverkehrbringen von Photovoltaikmodulen, der Erfassung sowie der anschließenden Behandlung und Verwertung von Photovoltaikaltmodulen beinhaltet die Gesetzesnovelle eine Vielzahl an akteursspezifischen Mittteilungs-, Nachweis- und Dokumentationspflichten. Abgesehen von § 22 Absatz 3 des ElektroG2 und den schon diskutierten Paragraphen finden sich diese Vorgaben in konzentrierter Form in den §§ 25 bis 30. Da diese Obliegenheiten keine Diskussionsrelevanz besitzen weil nicht Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit, wird abermals von einem Diskurs der betreffenden Paragraphen abgesehen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit der Aufnahme von Photovoltaikmodulen in den Bannkreis der Gesetzesnovelle den verschiedenen Akteuren einer Fülle an Vorschriften und Obliegenheiten auferlegt werden. Dabei muss jedoch eine gezielte Unterscheidung von Altmodulen und historischen Altmodulen, sowie von EEA aus privaten Haushalten und von anderen Nutzern als private Haushalte getroffen werden. Die verschiedenen Kombinationen dieser Merkmale führen zu abweichenden Verpflichtungen seitens der Akteure. Leider wird im Gesetzestext der jeweilige Sachverhalt nicht vollends deutlich abgegrenzt. Beispielshalber unterscheidet die Gesetzesnovelle klar Altmodule und historische Altmodule per Definition mittels des Stichtages des Inverkehrbringens (laut § 3 Nummer 4 Buchstabe b der 24. Oktober 2015), schließt jedoch jene historischen Altmodule nicht ausdrücklich in ihre Vorschriften zur Sammlung und Rücknahme von Altgeräten privater Haushalte mit ein beziehungsweise aus. Bei Altgeräten anderer Nutzer als privater Haushalte werden indes die historischen Altmodule explizit aus den Regelungen ausgenommen (§ 19 Absatz 1 Sätze 2 und 3 des ElektroG2). Der Definition im § 3 Nummer 4 Buchstabe b folgend stellen Photovoltaikmodule, welche vor Inkrafttreten der Gesetzesnovelle installiert wurden und bereits die Abfalleigenschaft nach dem KrWG innehaben oder nach dem Inkrafttreten der Gesetzesnovelle zu Abfall werden, historische Altmodule dar. Sonach sind per Definition nur nach dem Inkrafttreten der Gesetzesnovelle installierte Photovoltaikmodule mit dem Erreichen der Abfalleigenschaft tatsächlich der Begrifflichkeit „normaler“ Altmodule zuzuordnen. Da im Gesetzestext des ElektroG2 in den Ausführungen zur „Sammlung und Rücknahme“ (Abschnitt 3) und zu den „Behandlungs- und Verwertungspflichten, Verbringung“ (Abschnitt 4) für Geräte aus privaten Haushalten durchweg nur „Altgeräte“ berücksichtigt werden, diese jedoch nicht die enorme Menge national installierter Photovoltaikmodule mit einschließen, stellt sich zwangsläufig die Frage nach dem tatsächlichen Anwendungsbereich sowie der vorgesehenen Handhabe von jenen historischen Altmodulen im Sinne des Gesetzes.

Dies wird jedoch beim konsekutiven Anwenden der Paragraphen zur Registrierung und den Paragraphen des Abschnittes 3 des ElektroG2 transparent. Für die Registrierungspflicht von Photovoltaikmodulherstellern gibt es nach § 46 Absatz 9 eine Übergangsfrist bis zum 1. Februar 2016. Die monatliche Meldungspflicht der in den Verkehr gebrachten Photovoltaikmodule umfasst dabei nur die ab der Registrierung tatsächlich in den Verkehr gebrachten Photovoltaikmodule. Der Einschluss in die Sammlung und damit

in die weiteren Bestimmungen des Gesetzes über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten erfolgt durch die Einordnung in den Anwendungsbereich ab dem Inkrafttreten des Gesetzes und den fehlenden Anschluss historischer Altmodule bei der Sammlung. Sprich, die Rücknahmeverpflichtung der für Photovoltaikmodule registrierten Hersteller umfasst im Rahmen der Abholkoordination durch die stiftung ear bei den örE im Sinne des § 31 Absatz 5 des Elektrog2 sowohl Altmodule, die vor dem Inkrafttreten der Gesetzesnovelle in den Verkehr gebracht wurden (historische Altgeräte), als auch jene, die nach diesem Stichtag in den Verkehr gebracht werden („normale“ Altgeräte). Sonach ist festzuhalten, dass sich im Bereich der privaten Haushalte die Obliegenheiten der Akteure bezogen auf die kostenfreie Rücknahme, die Sammlung und die Behandlung vereinfachend für historische und „normale“ Altmodule gleichen[124].

Das Gesetz zur Neuordnung des Rechts über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten stellt sich pauschal als mannigfaltig und hoch bürokratisch dar, wodurch der längst bestehende Kostendruck deutscher Hersteller infolge der Compliance mit den Gesetzesvorschriften weiter steigen wird.

Die nachstehende Tabelle 5-2 fasst dieserhalb die betrachtungsrelevanten Obliegenheiten, welche sich nach dem ElektroG2 mit Blick auf das Inverkehrbringen, die Sammlung und Rücknahme sowie die Behandlung und Verwertung eines $gSSM_{sc/mc}$ ergeben, jeweils für die Hersteller, die Vertreiber, die örE und den entsprechenden Entsorgungspflichtigen zusammen; zu Gunsten der Übersichtlichkeit jedoch exklusive der Fülle an Mittteilungs-, Nachweis- und Dokumentationspflichten. Weiter gelten die Angaben in der Tabelle 5-2 lediglich für Altmodule und historische Altmodule privater Haushalte. Die Vorschriften zum Umgang mit Altmodulen anderer Nutzer als private Haushalte beschränken sich nur auf den § 19 des ElektroG2 und damit auf die Rücknahmeverpflichtungen.

[124] Dieser Sachverhalt wurde gleichwohl bereits mehrfach für andere Elektro- und Elektronikgeräte gerichtlich bestätigt, final für das Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (ElektroG) vom 16.03.2005, dann vom Bundesverwaltungsgericht in [BVerwG 2009], worin ein Kostenzurechnungsprinzip für historische Altgeräte sowie eine Gruppenfinanzierungsverantwortlichkeit für Waisengeräte definiert ist.

Tabelle 5-2: Zusammenfassung der betrachtungsrelevanten Obliegenheiten bezüglich des Inverkehrbringens, der Sammlung und Rücknahme sowie der Behandlungs- und Verwertungspflichten aller Akteure nach den Vorgaben des ElektroG2.

Obliegenheiten der verschiedenen Akteure nach dem ElektroG2			**Entsprechender Paragraph des ElektroG2**	**Erläuterungen**
Hersteller	**Produktkonzeption**		§ 4 Absatz 1	Gestaltungsvorschriften zur leichteren Demontage, Wiederverwendung und Verwertung von Altgeräten
	Registrierungs-pflicht		§ 6 Absatz 1 i.V.m. Anlage 2	Vor dem Inverkehrbringen ordnungsgemäß beim Umweltbundesamt zu registrieren. Beachte dazu die Übergangsfrist gemäß § 46 Absatz 9
	Einrichtung einer gemeinsamen Stelle		§ 5 Absatz 1	stiftung ear
	Finanzierungs-garantiestellung		§ 7 Absätze 1 und 2	Kalenderjährlicher Nachweis gegenüber dem Umweltbundesamt einer insolvenzsicheren Finanzierungsgarantie der Rücknahme und Entsorgung
	Kennzeichnungs-pflicht		§ 9 Absätze 1, 2 i.V.m. Anlage 3	Kennzeichnung von PV-Modulen mit der durchgestrichenen Abfalltonne
	Aufstellen von Behältnissen		§ 15 Absätze 1 und 3	Kostenfreie Bereitstellung geeigneter Sammelbehältnisse
	Rücknahmepflicht		§ 16 Absatz 1	Nach Zuweisung durch Umweltbundesamt verpflichtende Abholung an entsprechender Übergabestelle (Teilnahmepflicht an der ear-Abholkoordination)
			§ 16 Absätze 3 und 4	Nach Abholung neue Behältnisse bereitstellen und Kosten für Abholung, Entsorgung und Aufstellen der Tauschbehältnisse tragen
			§ 16 Absatz 5	Möglichkeit des Betreibens individueller oder kollektiver Rücknahmesysteme, wobei eigenen Rücknahmestellen eingerichtet werden müssen
Vertreiber [a]	**Rücknahmepflicht**		§ 17 Absatz 1 Nummer 1	„1:1 Rücknahmepflicht“: kostenfreie Rücknahme von Altmodulen am Ort der Übergabe bei Kauf von Geräten der gleichen Geräteart
			§ 17 Absatz 1 Nummer 2	„0:1 Rücknahmepflicht“: unentgeltliche und vom Kauf eines Neugerätes unabhängige Rücknahmeverpflichtung von Altgeräten, die keine äußere Kantenabmessung von mehr als 25 cm besitzen
			§ 17 Absatz 3	Möglichkeit der freiwilligen, jedoch für den Endnutzer kostenfreien Rücknahme
			§ 17 Absatz 4	Einrichtung eigener Rücknahmestellen
	Entsorgungspflicht		§ 17 Absatz 5	Eigenverantwortliche Entsorgung der Altgeräte, falls sie nach der Sammlung nicht den örE oder den Herstellern übergeben werden
örE	**Sammlungs-verpflichtung**		§ 13 Absätze 1, 3 und 4	Bereitstellung einer der Bevölkerungsdichte adäquaten Anzahl von Sammelstellen, um privaten Haushalten und Vertreibern eine zumutbare und kostenfreie Rückgabe zu ermöglichen
			§ 13 Absatz 5	Einrichtung von Übergabestellen zur Abholung durch den beauftragten Hersteller
	Bereitstellung abzuholender Altmodule		§ 14 Absatz 3	Ab einer Abholmenge von mind. 2,5 m³ Meldung an die stiftung ear der zur Abholung bereitstehenden Behältnisse
	Im Falle der Optierung	**Anzeige-pflicht**	§ 25 Absatz 1 Satz 3	Eine Optierung ist mind. 6 Monate vor der Optierungsabsicht beim Umweltbundesamt anzuzeigen
		Bindungs-pflicht	§ 14 Absatz 5 Satz 1	Die Optierung ist für 2 Jahre bindend. Die entsprechenden Altgeräte sind für diesen Zeitraum von der Bereitstellung zur Abholung auszunehmen
		Entsorgungs-pflicht	§ 14 Absatz 5 Satz 3	Eigenverantwortliche Entsorgung der optierten Altgeräte

Fortsetzung **Tabelle 5-2.**

	Obliegenheiten der verschiedenen Akteure nach dem ElektroG2	**Entsprechender Paragraph des ElektroG2**	**Erläuterungen**
Jeweiliger Entsorgungspflichtiger [b]	**Vorbereitung zur Wiederverwendung**	§ 20 Absatz 1 Sätze 2 und 3	Prüfung im Rahmen der technischen und wirtschaftlichen Zumutbarkeit, ob EEA oder Teile zur Vorbereitung zur Wiederverwendung geeignet sind
	Erstbehandlung	§ 20 Absatz 1 Satz 1 und Absatz 2 i.V.m. Anlage 4 sowie Absatz 4	Entfernung aller externen elektrischen Leitungen im Sinne der selektiven Behandlung bevor weitere Verwertungs- und Beseitigungsmaßnahmen durchgeführt werden dürfen
	Zertifizierungs-pflicht der Erstbehandlungs-anlagen	§ 21 Absatz 1	Die Erstbehandlung von Altmodulen darf nur in zertifizierten Erstbehandlungsanlagen erfolgen
	Einhaltung von Mindestquoten (geschlossener Anwendungs-bereich)	§ 22 Absatz 1 Nummer 2 Buchstabe a	Der Anteil der Verwertung muss mindestens 80 % betragen (Gerätekategorie 4)
		§ 22 Absatz 1 Nummer 2 Buchstabe b	Der Anteil des Recyclings und der Vorbereitung zur Wiederverwendung muss mindestens 70 % betragen (Gerätekategorie 4)
	Einhaltung von Mindestquoten (offener Anwend-ungsbereich)	§ 22 Absatz 1 Nummer 1 Buchstabe a	Der Anteil der Verwertung muss mindestens 85 % betragen (Gerätekategorie 4)
		§ 22 Absatz 1 Nummer 1 Buchstabe b	Der Anteil des Recyclings und der Vorbereitung zur Wiederverwendung muss mindestens 80 % betragen (Gerätekategorie 4)

Legende:

→ vor / beim Inverkehrbringen → Sammlung und Rücknahme → Behandlung → Verwertung

Hochgestellte Indizes: **a** → Gilt nur für Vertreiber ab einer Verkaufsfläche von 400 m², respektive einer Fläche von mehr als 400 m² aller Lager- und Versandflächen für Elektro- und Elektronikgeräte im Falle des Vertriebs über Fernkommunikationsmittel.

b → Die Vorschriften zur Behandlung und Verwertung sind nicht den einzelnen Akteuren zugeordnet, da sie sich für den jeweiligen Entsorgungspflichtigen gleichen.

Nachdem nun der gesetzliche Rahmen für Photovoltaikmodule als Ganzes diskutiert wurde, stellt sich anschließend die Frage nach rechtlichen Restriktionen auf Stoffebene. Hierzu wird die Betrachtungsebene der Gesetzestexte weiter eingegrenzt. Die folgende Diskussion orientiert sich dabei am bisherigen Modus Procedendi und stellt kapitelintern den europäischen Richtlinien und Verordnungen ihre etwaigen nationalen Pendants gegenüber. Die rechtlichen Rahmenbedingungen beispielshalber zum Verwendungs-verbot spezieller Stoffe oder Stoffgruppen, gleichwohl auf europäischer oder nationaler Ebene, beschränken sich dabei auf den Entwurf und die Konstruktion von Photo-voltaikmodulen, sprich auf Vorgaben vor deren Inverkehrbringen. Zudem bleiben die Betrachtungen und Diskussionen der nachstehenden Gesetzestexte auch weiterhin auf Restriktionen bezüglich eines $gSSM_{sc/mc}$ limitiert.

5.1.3 RoHS und ElektroStoffV

Neben den bereits diskutierten Gesetzestexten nimmt in der europäischen Gesetzgebung im Bereich der Elektro- und Elektronikgeräte auf Stoffebene die Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (im Folgenden mit RoHS2 abgekürzt) allgemein betrachtet eine bedeutungsvolle Rolle ein. Gegenstand der RoHS2 ist nach ihrem ersten Artikel die Festlegung von Verwendungsrestriktion bestimmter Gefahrstoffe und gefährlicher Stoffverbindungen in Elektro- und Elektronikgeräten sowie elektronischen Bauteilen. Im Gegensatz zur Abfallrahmenrichtlinie und zur WEEE2 finden sich in den richtlinienspezifischen Begriffsbestimmungen im Artikel 3 der RoHS2 keine Begrifflichkeiten der Abfallwirtschaft. Dies unterstreicht die Ausrichtung der Richtlinie insofern, als dass die Stoffbeschränkungen der RoHS2 vor dem beziehungsweise spätestens beim Inverkehrbringen von Elektro- und Elektronikgeräten ansetzen. Ob der Ausrichtung der RoHS2 auf die Phase vor der Nutzung von Elektro- und Elektronikgeräten egalisiert sich zudem eine Unterteilung der richtlinieninternen Vorschriften für Elektro- und Elektronikgeräte für den privaten Gebrauch und andere Nutzer als private Haushalte. Gleiches gilt für ihr nationales Pendant: die Verordnung zur Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten, auch Elektro- und Elektronikgeräte-Stoff-Verordnung (kurz: ElektroStoffV) genannt. Deren Ausfertigung am 19.04.2013 diente der Umsetzung der RoHS2 in deutsches Recht. Durch den gleichen Bezugspunkt kommt die ElektroStoffV in ihren Begriffsbestimmungen nach § 2 ebenfalls ohne abfallwirtschaftliche Termini aus. Wenngleich die RoHS2 und die ElektroStoffV beide den Fokus auf Konzentrationshöchstwerte in homogenen Werkstoffen legen, wodurch sie beispielshalber die Verwendungseinschränkung bleihaltiger Lötlegierungen als Gegenstand haben, ergeben sich daraus keinerlei Restriktionen für standardisierte Photovoltaikmodule aller Technologieklassen. Grund ist die ausdrückliche Präklusion von Photovoltaikmodulen aus dem Geltungs- bzw. Anwendungsbereich beider Gesetzestexte nach Artikel 2 Absatz 4 Buchstabe i der RoHS2 und § 1 Absatz 2 Nummer 9 der ElektroStoffV in fast wortgleicher Weise durch den Ausschluss des definierten $gSSM_{sc/mc}$ aus deren Bannkreis. Dieserhalb wird von einer vertiefenden Diskussion zu den Vorschriften der RoHS2 und der ElektroStoffV in der vorliegenden Arbeit abgesehen.

5.1.4 Abfallverbringungsverordnung und -gesetz

Welche gesetzlichen Regelungen greifen anschließend beim Transport etwaiger Abfälle wie beispielshalber einem Altmodulimport aus Anrainerstaaten? Zur Beantwortung dieser Frage ist zuvörderst der Betrachtungsraum abzugrenzen. Findet ein transnationaler Abfalltransport in, aus oder über ein Mitgliedsstaat der EU statt, kommt die Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Juni 2006 über die Verbringung von Abfällen (kurz: Abfallverbringungsverordnung; im Folgenden mit VVA abgekürzt) zur Anwendung. Diese regelt die Abfallverbringung in der EU, wobei Verbringung vereinfacht gesagt für den Export, den Import und den Transit in, aus oder durch einen EU-Mitgliedsstaat steht. Eine genaue Definition gibt die VVA im Artikel 2 Nummer 34 Buchstabe a bis g.

Das deutsche Pendant zur VVA ist das sogenannte Gesetz zur Ausführung der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Juni 2006 über die Verbringung von Abfällen 1) und des Basler Übereinkommens vom 22. März 1989 über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung 2) (kurz: Abfallverbringungsgesetz; nachstehend mit AbfVerbrG abgekürzt). Grundlage des Gesetzes bildet die VVA, jedoch mit Bezug auf das deutsche Bundesgebiet. Es regelt folglich die Abfallverbringung nach, aus oder durch Deutschland, beziehungsweise § 1 Nummer 2 des AbfVerbrG folgend die Abfallverbringung zwischen Orten auf deutschen Bundesgebiet, falls hierfür andere Staaten durchquert werden.

Bezüglich dem Recycling von Photovoltaikmodulen ist an dieser Stelle eine tiefgreifende Betrachtung der gesetzlichen Rahmenbedingungen für eine transnationale Abfallverbringung ob dem Fokus der vorliegenden Arbeit auf das ostdeutsche Produktionscluster in Verbindung mit den vernachlässigbaren Installationsmengen in den Anrainerstaaten Polen und Tschechien nicht zielführend und wird dieserhalb nicht weiter verfolgt.

Vielmehr ist die Frage nach den gesetzlichen Rahmenbedingungen bei der Abfallverbringung innerhalb Deutschlands von Interesse. Hierfür maßgebliche nationale Vorschriften sind neben dem KrWG und dem AbfVerbrG:

- die Verordnung über das Anzeige- und Erlaubnisverfahren für Sammler, Beförderer, Händler und Makler von Abfällen (kurz: Anzeige- und Erlaubnisverordnung; abgekürzt mit AbfAEV) und
- die Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen (kurz: Nachweisverordnung; abgekürzt mit NachwV).

Die AbfAEV trat am 1. Juni 2014 in Kraft und ersetzte die Beförderungserlaubnisverordnung (abgekürzt: BefErlV). Sie regelt die Anzeigepflicht und die Erlaubniserteilung nach den §§ 53 und 54 des KrWG für Sammler, Beförderer, Händler und Makler von Abfällen und gefährlichen Abfällen. Ein weiterer zentraler Punkt dieser Verordnung stellt deren Abschnitt 2: „Anforderungen an Sammler, Beförderer, Händler und Makler von Abfällen“ dar, worin die nach dem KrWG geforderte Zuverlässigkeit sowie die benötigte Fach- und Sachkunde der Anzeige- oder Erlaubnispflichtigen definiert werden.

Schwerpunkte der NachwV, welche teilweise am 1. Februar 2017 in Kraft getreten ist[125], sind nach [BMUB 2007] neben der Steuerung der systematisierten Entsorgungsüberwachung von Abfällen durch entsprechende Begleit- und Übernahmescheine, Register sowie Entsorgungsnachweise die folgenden:

- Angleichung und Einarbeitung der Vorgaben aus der Abfallrahmenrichtlinie und der VVA durch beispielshalber Internalisierung der vorgegebenen Register,
- vereinfachte Nachweisführung infolge der bestehenden Vollzugserfahrungen,
- vereinfachte Entsorgungsnachweisführung sowie Angleichung von EMAS-Standorten und Entsorgungsfachbetrieben bezüglich der Privilegienbewilligung für Umweltmanagementsysteme und
- Einführung des elektronischen Nachweisverfahrens.

Das elektronische Nachweisverfahren dient vordergründig dem bundesweiten Nachweisdatenaustausch zwischen zuständiger Behörde und Nachweispflichtigem. Die Datenabwicklung erfolgt über eine zentrale Koordinierungsstelle: die ZKS-Abfall.

[125] Die Vorschriften zum Teil 2 Abschnitt 4 (§§ 17 bis 22): „elektronische Nachweisführung“ der NachwV, mit Ausnahme von §18 Absatz 1 Satz 2, traten erst zum 1. April 2010 in Kraft.

5.1.5 Weitere relevante Gesetzestexte

Die nachfolgend aufgeführten Gesetzestexte sind für den Gegenstand dieser Arbeit nicht essenziell weil vom Recycling abweichende Ansatzpunkte; für eine ganzheitliche Betrachtung sowie ob etwaiger Argumentationsrelevanz in subsekutiven Kapiteln jedoch unabdingbar. Dieserhalb erfolgt anstelle einer detaillierten Diskussion eine Auflistung samt kurzer Erläuterung.

Ein Beispiel stellt die Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission (abgekürzt mit REACH[126]) dar. REACH ist insofern von Bedeutung, als dass es die Zulassung und Verwendungserlaubnis für chemische Stoffe an sich sowie in Gemischen und Erzeugnissen in Hinblick auf den Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt regelt. Hierfür unterliegen Produzenten, Importeure oder Lieferanten der Chemikalien je nach Einstufung verschiedensten Informations- und Kennzeichnungspflichten. Nach der im Artikel 5 von REACH formulierten Maxime: „no data, no market“ dürfen nur chemische Stoffe in den Verkehr gebracht werden, die registriert sind und für die eine adäquate Datengrundlage vorliegt. Ausdrücklich ausgenommen aus den Geltungsbereich dieser Verordnung sind Abfälle. Für das Recycling von Photovoltaikmodulen ist REACH dennoch von Bedeutung, da es sowohl den Einsatz von chemischen Stoffen während der Produktion von Photovoltaikmodulen, als auch die Verwendung bestimmter Chemikalien während möglicher Recyclingprozesse (beispielshalber in Chemikalienbädern) reglementiert. Zu den diskussionsrelevanten Artikeln der Verordnung wird aufgrund dessen erst an den entsprechenden Stellen ein direkter Bezug hergestellt, beziehungsweise deren Diskussion in die Argumentationsstruktur inhaltsbezogen eingebaut.

[126] Die Abkürzung REACH setzt sich aus der englischen Bezeichnung zusammen und steht für Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals.

Gleichwohl ist an dieser Stelle die Verordnung (EU) Nr. 1179/2012 der Kommission vom 10. Dezember 2012 mit Kriterien zur Festlegung, wann bestimmte Arten von Bruchglas gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates nicht mehr als Abfall anzusehen sind (abgekürzt mit BruchgV) aufzuführen, da deren Gegenstand nach Artikel 1 der BruchgV Kriterien umfasst, wann Bruchglas die Abfalleigenschaft entzogen wird. Für das Recycling von Photovoltaikmodulen ist dies insofern von Bedeutung, da ein $gSSM_{sc/mc}$ zu rund 69 Masen-% aus Glas besteht.

Abschließend ist noch die Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt (kurz Niederspannungs-richtlinie) aufzuführen, da Photovoltaikmodule in ihren Geltungsbereich fallen und eine CE-Kennzeichnungspflicht besteht. Mittels der CE-Kennzeichnung versichert der Inverkehrbringer, dass er die Vorgaben der EN 61730 (Sicherheitsqualifizierung von Photovoltaikmodulen) erfüllt, welche unter der Niederspannungsrichtlinie gelistet ist.

5.2 Prognose des möglichen Altmodulaufkommens

Der Wandel der Photovoltaik vom Nischenprodukt zu einer potenziellen Energiequelle des 21. Jahrhunderts stellt sich auf allen Ebenen – mondial bis regional – stark unterschiedlich dar. Wenngleich Deutschland seit der Jahrtausendwende eine globale Vorreiterrolle im konkreten Einsatz dieser Technologie einnahm, verliert es allgemach seine internationale Vormachtstellung. Staaten wie China, Japan und Nationen aus dem Sonnengürtel drängen verstärkt auf den Markt der jährlich neuinstallierten Kapazitäten und induzieren so eine globale Marktverschiebung. Trotz eines wachsenden Globalmarktes ist in Deutschland und speziell in der Region Sachsen samt Anrainer indes zukünftig von weiter sinkenden Marktbeiträgen auszugehen. Dies hat unterschiedlichste Auswirkungen auf die für ein wirtschaftliches Recycling notwendigen regionalen Quantitäten der Abfallströme, welche teilweise örtlich als auch zeitlich direkt mit der regionalen Marktentwicklung korrelieren.

Ein Fazit aus der regionalen Betrachtung (Kapitel 4.2.4) war daher, dass in naher Zukunft kaum mit Abfallströmen aus Altanlagen oder Repoweringmaßnahmen zu rechnen ist. Hauptquelle für ein mögliches Recycling bleiben neben Produktionsabfällen (regional sinkend durch globale Marktverschiebung und damit einhergehender Verlagerung der Produktion aus Deutschland und Europa) weiterhin Abfallströme aus Transport- und Installationsschäden sowie Garantiefällen. Beide letztgenannten Gruppen hängen wiederum direkt von der Entwicklung des regionalen Marktes für Neuinstallationen ab, wobei sich diese jedoch ob ungewisser zukünftiger Verteilungsschlüssel neuinstallierter Anlagen und möglicher sprunghafter Kapazitätszuwächse als imponderabel darstellt.

Gegenstand dieses Kapitels soll daher neben der Prognose nationaler und regionaler Abfallströme von kristallinen Siliziumsolarmodulen eine Diskussion der theoretischen Grundlagen zu den einzelnen Abfallströmen sein. Die theoretischen Grundlagen unterteilen und definieren dabei nicht nur die einzelnen Abfallströme, sie bilden vielmehr die Prämisse zur anschließenden Abfallprognose. Gleichwohl können so etwaige Annahmen zur tatsächlichen Berechnung begründet eingeführt werden, wodurch sich der Betrachtungsrahmen im Voraus sinnvoll determinieren lässt. Im anschließenden Unterkapitel: „Prognose der jährlichen Altmodulströme“, finden diese Annahmen, Eingrenzungen und Definitionen Anwendung und bilden sonach mit den Daten aus den Kapiteln 4.2, 4.5 und 4.7 die Berechnungsgrundlage.

5.2.1 Theoretische Grundlagen

Eine übersichtliche und klar abgegrenzte Einführung in die theoretischen Grundlagen der einzelnen Abfallströme bedarf zuvörderst deren Strukturierung. Wenngleich die betrachtungsrelevanten Abfallströme prinzipiell nach dem Zeitpunkt ihres Auftretens in:

- Produktionsausschuss,
- Abfälle kurz vor und während der Nutzungsphase eines kristallinen Siliziumsolarmoduls sowie
- Altmodule am Ende der Nutzungsphase

unterteilt werden können, ist diese zeitliche Ebene je Abfallart weiter zu spezifizieren.

Im Falle des Produktionsausschusses sind verschiedene Abfallarten möglich. Durch den Fokus dieser Arbeit auf kristalline Siliziumsolarmodule werden hierfür nur die Ausschüsse an Wafern, Zellen und Modulen betrachtet, wobei diese speziellen Abfallarten von der jeweiligen Produktionsstufe abhängen. Gleichwohl können während der entsprechenden Produktionsprozesse auch weitere Produktionsabfälle wie beispielshalber Verschnitt auftreten.

Bei den beiden anderen Abfallarten (Abfälle kurz vor und während der Nutzungsphase eines kristallinen Siliziumsolarmoduls sowie Altmodule am Ende der Nutzungsphase) treten als Abfallspezifikation indes nur Altmodule auf. Hierbei ist jedoch nach der Ursache weiter zu spezifizieren. So beinhaltet der Abfallstrom aus Altmodulen, der sich auf die Zeit kurz vor und während der Nutzungsphase eines kristallinen Siliziumsolarmoduls bezieht, Installations- und Transportschäden sowie Garantie- und Gewährleistungsfälle (vorzeitiger Austausch des Solarmoduls aufgrund von funktionsbeeinträchtigenden Zwischenfällen); in toto also schadhafte Module.

Eine Spezifizierung der Abfallart von Altmodulen am Ende der Nutzungsphase zeitigt zwei Arten; Altmodule am Ende der Lebensdauer und Altmodule durch vorzeitiges Repowering, wobei diese Unterscheidung sich diffizil darstellt.

5.2.1.1 Produktionsausschuss und -abfall

Schon während der Produktion eines $gSSM_{sc/mc}$ nach der bereits dargelegten Produktionssequenz (vgl. Anhang 4-11) fallen an verschiedensten Stellen Ausschüsse und Abfälle an. Einige von ihnen sind zum Recycling kristalliner Siliziumsolarmodule gehörige Stoffströme und bei der Prognose / Berechnung regionaler Abfallströme mit zu beachten. Die Gruppe der hierfür vorerst diskussionsrelevanten Produktionsausschüsse umfasst genauer schadhafte oder leistungsarme Solarmodule, welche das standardisierte Prüfverfahren am Ende der Produktionssequenz nicht bestehen, als auch:

- während der Modulfertigung entstandener Ausschuss (beispielshalber infolge von Zellenbruch oder Gaseinschlüssen im Laminat),
- fehlerhaft prozessierte oder zerbrochene Siliziumsolarzellen während deren Produktion sowie
- zerbrochene oder schadhafte Siliziumwafer nach der Phosphordiffusion.

Neben diesen Produktionsausschüssen entstehen aber auch Produktionsabfälle aus der Modulfertigung und der Solarzellenproduktion selbst, wie beispielshalber Laminatverschnitt und Druckpastenüberschuss. Die als Produktionsabfälle deklarierten Stoffströme sind für die anstehende Betrachtung nicht essenziell und daher nebst der anschließenden Erläuterungen kein Bestandteil der weiteren Diskussion. Der Überschuss an Druckpaste zum Beispiel wird bereits prozessintern wiederverwendet. Zwar wird für den Siebdruck je Druckvorgang genau die benötigte Menge Druckpaste auf die Maske aufgebracht, jedoch zusätzlich zu einer initialen Menge. Dies ist für einen lücken- und makellosen Druck unabdingbar. Sonach ergibt sich in der Gesamtbilanz eines Druckvorganges kein Rest, wobei die jeweils aufgedruckte Schicht aus Teilen vorherig aufgebrachter oder Teilen der initialen Pastenmenge bestehen kann. Anders stellt sich die Situation beim Laminatverschnitt dar. Der flächenmäßige sechsprozentige Verschnitt nach dem Laminierungsprozess fällt zwar hochrein, aber technisch nur sehr schwierig wieder zu trennen weil fest vernetzt an. Laut [Ritter 2014] wird dieser Verschnitt teils thermisch[127] entsorgt, teils deponiert. Weitere Produktionsabfälle können sowohl über die *SSF*s der Tabelle 4-28 und Tabelle 4-29 auf den Seiten 290 und 299 identifiziert, als auch direkt den entsprechenden Produktionskapiteln entnommen werden.

[127] Die thermische Entsorgung ist ob des Fluoranteils im Tedlar kritisch und bedarf kontrollierte Prozessbedingungen.

Ein kristallines Siliziumsolarmodul beinhaltet neben den Massenwerkstoffen Glas und eloxiertes Aluminium insbesondere Solarzellen mit den verschiedenen Funktionsmaterialien. Ein ökologisch sinnvolles Modulrecycling, welches die Rezyklierung der Funktionsmaterialien impliziert, begreift ein Recycling der Solarzellen als substanziellen Schritt mit ein. Die Produktionsausschüsse an kristallinen Siliziumsolarzellen und -modulen können sonach in Abhängigkeit der spezifischen Ausschussursache einen Bestandteil des gesamten, für ein Recycling von Photovoltaikmodulen zur Verfügung stehenden Stoffstroms bilden. Dabei ist von essenzieller Bedeutung, bei welchem Prozessschritt der Ausschuss generiert wird und was dafür die Ursache darstellt. Bei den Ursachen kann prinzipiell zwischen Ausschüssen infolge von Bruch und Ausschüssen ob fehlerhaften oder nicht vollständigen Prozessschritten unterteilt werden. Die Abhängigkeit des Produktionsausschusses vom Prozessschritt wird besonders bei der Waferfertigung hin zur Produktion kristalliner Siliziumsolarzellen deutlich. Wenngleich der Anfall von Produktionsausschuss noch vor dem Prozessschritt der Phosphordiffusion (folglich maximal in der Spezifikation des bereits im Kapitel 4.5.4.1 gesondert gekennzeichneten Zwischenproduktes: p-dotierter, texturierter, kristalliner Siliziumwafer) erfolgt, ist er unabhängig von der Ausschussursache. Zudem trägt er nicht zum betrachtungsrelevanten Stoffstrom bei. Dies begründet sich darin, dass etwaige Ausschüsse zwischen Vereinzelung (inklusive der Reinigung im Chemikalienbad) und der Phosphordiffusion einen homogenen Werkstoff darstellen, welcher seit dem zugrunde liegenden Verfahren zur Einstellung der entsprechenden Kristallqualität keine weitere innermaterielle Verunreinigung erfahren hat. Es handelt sich sonach um den gleichen Werkstoff, welcher lediglich geometrisch an die Anforderungen angepasst wurde. Zusammen mit dem Verschnitt der Ingotpräparation und etwaigen Schmelzresten aus der Ingotherstellung kann dieser Waferausschuss unabhängig seiner Kristallqualität im Idealfall direkt wieder der Schmelze für das CZ- oder das Kokillengussverfahren zugeführt werden. Da die vorliegende Arbeit das Recycling von Photovoltaikmodulen – genauer das Recycling kristalliner Siliziumsolarmodule – als Gegenstand hat, ist der Produktionsausschuss vor der Phosphordiffusion nicht weiter betrachtungsrelevant. Vielmehr stellt sich nun die Frage, wie mit dem Ausschuss nach der Phosphordiffusion weiter zu verfahren ist und welchen Beitrag dieser zum fokussierten Abfallstrom leisten kann. Diesbezüglich spielt die Ausschussursache die entscheidende Rolle.

Infolge der Phosphordiffusion liegt nunmehr kein homogener Werkstoff vor. Der p-dotierte, texturierte, kristalline Siliziumwafer ist rundumher von einer n^+-dotierten Schicht mit einer Eindringtiefe von rund 250 nm umgeben. Bis hin zur Kontaktfeuerung werden die Vorder- und Rückseite je Prozessschritt zudem mit weiteren Schichten „verunreinigt“ (ausgenommen ist hierbei die sich an die Phosphordiffusion anschließende Kantenätzung).[128] Kommt es währenddessen zu Produktionsausschüssen durch fehlerhafte oder unvollständige Prozessschritte können diese in der Form behandelt werden, dass die „Verunreinigungen“ wieder von den Oberflächen inklusiver der Eindringtiefe entfernt werden, um im Ergebnis wieder einen kristallinen Siliziumrohwafer zu erhalten. Dies kann durch entsprechende Schleif- oder Ätzprozesse bewerkstelligt werden; im besten Fall kann durch die Anpassung der Rückätzprozesse die Oberflächentexturierung erhalten bleiben, wodurch für diesen Produktionsausschuss eine Rezyklierung als höherwertiger p-dotierter, texturierter, kristalliner Siliziumwafer direkt in die Solarzellenproduktion möglich wird. Anders verhält es sich bei Bruchausschuss, da dieser zwar bei gleicher Behandlung den materiellen Anforderungen an einen kristallinen Siliziumrohwafer nachkommt, nicht aber den geometrischen. Deshalb kann keine produktionsinterne Rezyklierung als Rohwafer erfolgen. Werden jedoch die vorangegangen gezielten „Verunreinigungen“ durch entsprechende Ätzprozesse von den Bruchstücken entfernt, besitzt das Material die gleichen Spezifikationen wie SGS_p. Die auf diese Weise gereinigten Bruchausschüsse können unmittelbar dem CZ- oder dem Kokillengussverfahren zur Ingotherstellung zugeführt werden und substituieren so Teile des energieintensiv raffinierten SGS_p. Wenngleich dies ebenfalls für den just beschriebenen Produktionsausschuss durch fehlerhafte oder unvollständige Prozessschritte gilt, ist es indes alleinig durch die abrasiven Materialverluste während der Wafervereinzelung für diese Ausschussart nicht zu empfehlen. Falls der Ausschuss während oder nach dem Siebdruck auftritt, enthält er bereits die in den vorangegangenen Kapiteln hervorgehobenen Rohstoffe wie Silber, Bismut, Aluminium et cetera. Die Handhabe dieser Rohstoffe stellt allerdings nicht den Diskussionsgegenstand dieses Kapitels dar. Detaillierte Ausführungen der zugrunde liegenden Prozesse und sich ergebender Einzelfraktionen inklusiver deren Verwendbarkeit sowie etwaige weitere Einsatzgebiete der Recyclingprodukte finden sich im Kapitel 5.3: „Technologische Ansätze und erprobte Verfahren“.

[128] Eine detaillierte Diskussion der einzelnen Prozessschritte findet sich im Kapitel 4.5.4.1 ab Seite 251.

Nach der Kontaktfeuerung liegen alle Eigenschaften einer kristallinen Siliziumsolarzelle vor. Gleichwohl erfolgt keine weitere Änderung der Spezifikationen und des Aufbaus kristalliner Siliziumsolarzellen nach der Kontaktfeuerung. Da für kristalline Siliziumsolarzellen nach der Kontaktfeuerung je nach Ausschussursache die gleichen Verfahrensweisen Anwendung finden, wie sie im vorangegangenen Absatz beschriebenen wurden, gilt dies analog für den gesamten nachfolgenden Produktionsausschuss bis zum Prozessschritt der Stringverlötung; jedoch mit einem Unterschied im Falle von Zellenbruch.

Kommt es während des beschriebenen Abschnittes der Fertigungssequenz nach der Kontaktfeuerung zu Ausschüssen einer sonst im vollen Maß funktionstüchtigen Solarzelle infolge eines Bruchs, ist die weitere Verwendung des Ausschusses abhängig von der Bruchzone. Laut [Ritter 2014] werden Solarzellenausschüsse mit einer „günstigen“ Bruchzone an Hersteller für Kleinsolaranwendungen wie beispielshalber Taschenrechner, Spielzeug et cetera abgegeben. Das entsprechende Anwendungsfeld solcher Ausschüsse sowie die Wahrung der Funktionsfähigkeit des Solarzellenbruchs (wie das Vorhandensein der elektrischen Sammelschienen der Frontkontakte und bei multikristallinen Siliziumsolarzellen adäquate Kristallgrenzen) präfabrizieren folglich die geometrischen Mindestanforderungen an die Bruchzone. Dieser Ausschussanteil steht dem für ein Modulrecycling vorhandenem Stoffstrom sonach ebenfalls nicht zur Verfügung.

Auf die Stringverlötung folgt gemäß Anhang 4-11 die Laminierung des bis dato losen Modulverbundes. Ergebnis ist ein fest vernetzter und im Idealfall luftfreier Materialverbund, welcher die Solarzellen umschließt. Sonach ist die Generierung etwaigen Produktionsausschusses ab dieser Prozessstufe unabhängig von der Ursache, da er in jedem Fall als Verbund anfällt. Dieser unterscheidet sich in erster Linie von einem kristallinen Siliziumsolarmodul lediglich durch die Absenz der Anschlussdose und -kabel, sowie der Rahmung. Die elektrische Anschlussdose und die Verbindungskabel müssen aber bei einem regulär anfallenden Altmodul ohnedem im Sinne der Erstbehandlung wieder entfernt werden. Somit würde sich der Produktionsausschuss, der während der Laminierung und der Nachbehandlungsschritte anfällt, nur noch in der fehlenden Rahmung von einem fertig prozessierten Solarmodul unterscheiden.

Allerdings erfolgt eine Detektion etwaiger Produktionsausschüsse durch standardisierte Prüfverfahren letztlich vor der Laminierung (auf Zellenbasis) und erst wieder in Form der Endprüfung hin zu einem $gSSM_{sc/mc}$. Es kann folglich von einem einheitlichen Ausschuss

ab dem Fertigungsschritt der Laminierung in Form kristalliner Siliziumsolarmodule ausgegangen werden, welche erst bei jener Endprüfung anfallen; ergo am Ende der gesamten Produktionssequenz. Diese unterscheiden sich stofflich nicht vom definierten $gSSM_{sc/mc}$.

Im Sinne der letztlich angestrebten Prognose des für ein Recycling von kristallinen Siliziumsolarmodulen zur Verfügung stehenden Stoffstroms werden folgende Vereinfachungen und Annahmen getroffen:

- Der nach Kapitel 4.5.5.2 einprozentige Produktionsausschuss von kristallinen Siliziumsolarmodulen fällt örtlich gebunden beim entsprechenden Modulproduzenten an und gilt unabhängig der absoluten jährlichen Gesamtproduktionsmenge für alle Modulproduzenten im gleichen Maß.
- Der ebenfalls im Kapitel 4.5.5.2 aufgeführte zweiprozentige Solarzellenausschuss ist fertigungseinheitenabhängig und bezieht sich auf fertig prozessierte Solarzellen, weshalb er in Gänze ebenfalls beim Modulhersteller als Zellenbruch anfällt. Dabei können die Teile einer Zelle mit „günstiger“ Bruchzone für Kleinsolaranwendungen direkt weiterverwendet werden und stehen so, wie bereits diskutiert, dem betrachtungsrelevanten Stoffstrom nicht zur Verfügung. Dies beinhaltet, dass selbst bei der Weitergabe solcher gebrochenen Zellenteile Reste als nicht unmittelbar weiterverwendbarer Ausschuss anfallen. Zusammengenommen wird der Anteil des Bruchausschusses, der nicht geradewegs weitergegeben werden kann, auf 70 % des Gesamtbruchausschusses festgelegt. Sonach ergibt sich die für ein Recycling von Solarmodulen relevante Bruchausschussrate aus dem 70 %-igen nicht direkt weitergebaren Anteil dieser Ausschussart multipliziert mit der 2 %-igen ursprünglichen Ausschussrate zu 1,4 %. Weiter gelten für jenen Bruchausschuss kristalliner Siliziumsolarzellen die gleichen Annahmen wie im vorherigen Stichpunkt festgehalten.
- Für die Produktionsausschüsse bei den Herstellern kristalliner Siliziumsolarzellen wird die Angabe des Waferausschusses nach Kapitel 4.5.4.2 zugrunde gelegt, jedoch unter folgenden Einschränkungen. Der angegeben sechsprozentige Waferausschuss während der Solarzellenfertigung wird nicht vollends auf Wafer bezogen. Grund ist, dass eine kristalline Siliziumsolarzelle eine Spezifikation eines kristallinen Siliziumwafers darstellt. Die Ausschussrate beinhaltet sonach auch Solarzellen, welche nach der Kontaktfeuerung bei der Prüfung und leistungs-

abhängigen Sortierung anfallen können. Dieserhalb wird der sechsprozentige Produktionsausschuss unterteilt in:

a) Zellenausschuss nach der Kontaktfeuerung und
b) Waferausschuss zwischen den Prozessschritten Kontaktfeuerung und Phosphordiffusion als „verunreinigter“ Wafer sowie tatsächlicher Waferausschuss vor der Phosphordiffusion.

Zuvörderst wird angenommen, dass sich der Ausschuss auf die beiden genannten Ausschussformen gleich verteilt[129]. Demnach entfallen je drei Prozent auf den Ausschuss in Form von Solarzellen und in Form von Wafern. Allerdings werden die Ausschüsse in Form von Wafern ob des Fokus dieser Arbeit auf das Recycling von Photovoltaikmodulen, was ein Recycling von Solarzellen mit einschließt, für die weitere Betrachtung außen vor gelassen. Zudem bleibt zu beachten, dass der Zellenausschuss nach der Kontaktfeuerung abermalig ursachenbedingt unterteilt werden muss in Bruchausschuss und Ausschuss aufgrund fehlerhafter oder unvollständiger Prozessschritte. Dabei gilt an dieser Stelle die gleiche Annahme der Rate des für ein Recycling von Photovoltaikmodulen zur Verfügung stehenden Stoffstroms am Gesamtbruchausschuss in Höhe von 70 %. Die ursachenbedingte Unterteilung des Solarzellenausschusses nach der Kontaktfeuerung wird wiederum als gleich verteilt angenommen. Es entfallen folglich je 1,5 % des Gesamtausschusses auf Bruchausschuss und Ausschuss aufgrund fehlerhafter oder unvollständiger Prozessschritte. Sonach ergibt sich die verwendbare Bruchausschussrate aus dem 70 %-igen nicht direkt weitergebaren Anteil dieser Ausschussart multipliziert mit 1,5 % zugewiesener Ausschussrate zu 1,05 %. In toto setzt sich folglich die beim Zellenhersteller anfallende betrachtungsrelevante Ausschussrate an der Zellengesamtproduktion aus dem verwendbarem Bruchausschuss in Höhe von 1,05 % und dem Zellenausschuss aufgrund fehlerhafter oder unvollständiger Prozessschritte in Höhe von 1,5 % zu 2,55 % zusammen. Dieser Gesamtausschuss fällt ebenfalls örtlich gebunden beim entsprechenden Zellenproduzenten an und gilt unabhängig der absoluten jährlichen Gesamtproduktionsmenge für alle Zellenproduzenten im gleichen Maß.

[129] Dies dient der Vereinfachung der Betrachtung. Selbst bei Unterschieden in der Verteilung zwischen den Ausschüssen bleibt die Abweichung zur getroffenen Vereinfachung ob des geringen Gesamtwertes vernachlässigbar klein.

- Wenngleich Ausschussraten unabhängig der Fertigungsstufe naturgemäß während des laufenden Produktionsbetriebes leichten Schwankungen unterliegen, soll für die folgenden Berechnungen deren Konstanz zugrunde gelegt werden. Ebenfalls werden höhere Schwankungen und Lerneffekte zum Anbeginn der Produktion bei den Ausschüssen nicht mit betrachtet, da der laufende Betrieb im Fokus steht. Gleichwohl ist bei der derzeitigen Marktlage nicht von Eröffnungen neuer Produktionslinien mit über 100 MW_p jährlicher Produktionskapazität in der betrachteten Region und in Deutschland zu rechnen. Sollten dennoch Werkseröffnungen mit großen Produktionskapazitäten in der jeweils betrachteten Region anstehen, sind die Prognosen der Abfallströme dahingehend anzupassen, dass eine durchaus hohe initiale Ausschussrate innerhalb der ersten Produktionsmonate zu erwarten ist. Dies deckt sich auch mit dem Modell nach [Fthenakis 2000], der von einer 20 %-igen Ausschussrate innerhalb der ersten sechs Monate nach Produktionsstart ausgeht. Im Sinne einer jährlichen Abfallprognose ist dieser Wert aber als zu hoch anzusehen und wäre mit 10 % anzusetzen.

Die nachstehende Tabelle 5-3 fasst nochmals alle, nach der vorangegangenen Diskussion, festgesetzten und betrachtungsrelevanten Ausschussraten in Abhängigkeit der Ausschussform und der Quelle übersichtlich zusammen.

Tabelle 5-3: Zusammenfassende Übersicht aller betrachtungsrelevanten Produktionsausschussraten in Prozent.

			Quelle		
			Modulproduzent	**Zellenproduzent**	
Ausschussform	**Kristallines Siliziumsolarmodul**		1 %		
	Kristalline Siliziumsolarzelle	**Als Bruch**	1,4 %	1,05 %	∑ = 2,55 %
		Infolge von Prozessfehlern		1,5 %	

Somit dienen die in der Tabelle aufgeführten Ausschussraten nun als Grundlage zur Prognose des für ein Recycling von Photovoltaikmodulen zur Verfügung stehenden Abfallaufkommens aus dem Teilstrom Produktionsausschuss.

5.2.1.2 Abfallaufkommen kurz vor und während der Nutzungsphase

Auch nach dem Produktionsprozess eines kristallinen Siliziumsolarmoduls entstehen für ein Recycling von Photovoltaikmodulen verfügbare Abfallströme. Eine mögliche Quelle ist das Abfallaufkommen kurz vor und während der Nutzungsphase eines kristallinen Siliziumsolarmoduls. Dieses Abfallaufkommen begreift die Abfallströme aus Installations- und Transportschäden sowie Garantie- und Gewährleistungsfällen ein. Der Definitionsraum setzt folglich direkt nach Abschluss der Produktionssequenz an, lässt aber Altmodule am technischen Lebensende und Solarmodule, die die Abfalleigenschaft aufgrund von Repoweringmaßnahmen zugesprochen bekommen, außen vor. Infolgedessen setzt sich dieser Teilstrom des für ein Recycling von Photovoltaikmodulen zur Verfügung stehenden Abfallaufkommens gänzlich aus kristallinen Siliziumsolarmodulen zusammen, die das standardisierte Prüfverfahren am Ende der Produktionssequenz passiert haben und ob eines Schadens jedweder Art einen funktionsbeeinträchtigenden oder sicherheitsrelevanten Defekt aufweisen; es handelt sich sonach rein stofflich ausschließlich um einen homogenen Abfallstrom aus $gSSM_{sc/mc}$ per getroffener Definition.

Um die Greifbarkeit der Eigenheiten der einzelnen Komponenten aus dem Abfallaufkommen kurz vor und während der Nutzungsphase eines kristallinen Siliziumsolarmoduls zu erhöhen, wird die anstehende Diskussion geteilt in Abfallaufkommen nach dem Produktionsprozess bis vor der Inbetriebnahme und Abfallaufkommen nach der Inbetriebnahme bis vor dem Erreichen des technischen Lebensendes. Da sich das Gesamtabfallaufkommen nach der Produktion gesamtheitlich nur aus $gSSM_{sc/mc}$ zusammensetzt, gilt dies im gleichen Maß für die beiden hier definierten Abfallsegmente. Das für ein Recycling von Photovoltaikmodulen zur Verfügung stehende Abfallaufkommen nach dem Durchlaufen der Produktionssequenz und damit dem Passieren der Endprüfung bis zur Inbetriebnahme umfasst Installations- und Transportschäden; das Abfallaufkommen nach der Inbetriebnahme bis vor dem Erreichen des technischen Lebensendes die sogenannten Garantie- und Gewährleistungsfälle sowie besondere Ereignisse.

Der Transport und die Installation der Photovoltaikmodule stellen die erste erhebliche Quelle einer Beschädigung nach deren Produktion dar. Laut [Köntges *et al.* 2011 und Reil *et al.* 2010] können schon beim Modultransport das Frontglas oder die Zellen im Laminatverbund aufgrund der Vibrationen und einzelner Stöße brechen, beziehungsweise Mikrorisse entstehen, sowie der Modulrahmen oder die Anschlussdose beschädigt werden. Gleichwohl können diese Beschädigungen auch während der Installation der Module auftreten. [Olschok *et al.* 2012] In toto sind die Gründe hierfür vielschichtig, meist jedoch nachstehende:

- Sturz der Module,
- falsche Transportsicherung,
- unsachgemäßes Entpacken der Module aus der Transportvorrichtung,
- unzulässige Belastungen der Module während deren Installation (beispielshalber durch Betreten der Module),
- falsche Einspannungen,
- nicht fachgerechtes Handling der Module und
- die bereits aufgeführten Vibrationen und Stöße während des Transports.

Wenngleich einige dieser Schäden mittels einer ersten Sichtung ohne optische Hilfsmittel erkennbar sind und einen sofortigen Austausch der Module nach sich ziehen, können auch „versteckte“ Defekte am Modul wie Mikrorisse oder eine überschrittene Zugbelastung der Kontakte der Modulanschlussdose erst nach der Inbetriebnahme direkte Auswirkungen zeitigen oder Folgedefekte bedingen.[130] Eine weitere Schadensursache ist die Gruppe der Planungsfehler. Zwar sind deren Auswirkungen zumeist erst nach der Inbetriebnahme der Solarmodule erkennbar, aufgrund der Ursachenzuordnung werden sie jedoch ebenfalls zu den Transport- und Installationsschäden gezählt. Beispiele hierfür sind eine falsche Systemauslegung, Modulmismatching sowie das Auftreten von Lichtbögen durch beschädigte Modulanschlussdosen (als Folge von Scherkräften durch falsch geortete Montageschienen). So unterschiedlich sich die Auswirkungen der möglichen Beschädigungen aus Transport, Installation und Planung auch darstellen, sind sie allzumal fast ausschließlich auf Defekte durch externe Einwirkungen zurückzuführen.

[130] Ein Überschreiten der Zugbelastung der Modulanschlussdosenkontakte kann bei Betrieb der Anlage einen Lichtbogen entstehen lassen, wovon eine hohe Brandgefahr ausgeht. Ein anderes Beispiel für die verzögerte Wirkung eines „versteckten“ Defektes durch einen Installationsfehler sind zu fest angezogenen Schrauben der Einspannung. Diese können entweder sofort, schleichend oder in Kombination mit weiteren externen Effekten wie Schneelast zu Glasbruch führen. Gleiches gilt für schlechte geometrische Eigenschaften der Einspannklemmen wie scharfe Kanten oder zu kurze Auflageflächen. Glasbruch als solches kann wiederum mehrere negative Effekte nach sich ziehen.

Ein Teil der Defekte aus den Transport- und Installationsschäden ist jedoch nicht mit bloßem Auge erkennbar und effiziert eine Beeinträchtigung erst in der Nutzungsphase des Moduls – zumeist in den ersten beiden Jahren ihrer Applikation. Dieserhalb erfolgt ein Austausch betreffender Module nicht vor dem Nutzungsbeginn, sondern mit der Feststellung eines Defektes während einer Anlagenüberprüfung oder einer sichtbaren Folgewirkung. Durch die zeitlich verzögerte Sichtbarkeit der Defekte werden Transport- und Installationsschäden statistisch mitunter in der Gruppe der sogenannten „Kinderkrankheiten“ geführt. Diese umfasst alle leistungsbezogenen oder sicherheitsrelevanten Beeinträchtigungen der Module die letztlich zu deren Austausch führen, begrenzt auf die ersten beiden Jahre der Nutzungsphase.

Durch externe Einflüsse auftretende Defekte, die eine leistungs- oder sicherheitsrelevante Beeinträchtigung zeitigen, können aber auch unabhängig ihrer Art jederzeit während der gesamten Nutzungsdauer eines kristallinen Siliziumsolarmoduls auftreten. Gleiches gilt für leistungs- oder sicherheitsrelevante Auswirkungen „versteckter“ Defekte. Folglich gestaltet sich der Übergang zwischen nicht umgehend detektierten Defekten aus der Gruppe der Transport- und Installationsschäden sowie allen anderen Defekten und Folgedefekten während der gesamten Nutzungsphase eines kristallinen Siliziumsolarmoduls als fließend. Zudem können während der gesamten Nutzungsphase der Module Folgewirkungen beziehungsweise Folgedefekte figurieren, welche nicht gänzlich auf externe Einflüsse zurückzuführen sind. Deren Ursprung ist zumeist in mangelnder Materialqualität oder unzulänglichen Produktionsschritten zu finden. Im Sinne der vorliegenden Arbeit werden nachstehend nur Defekte diskutiert, die einen Austausch der betroffenen Module nach sich ziehen und so einen Beitrag des für ein Recycling zur Verfügung stehenden Stoffstroms darstellen. Dies umfasst Defekte, die zu den bereits häufig aufgeführten leistungs- oder sicherheitsrelevanten Beeinträchtigungen der kristallinen Siliziumsolarmodule führen; jedoch in gewissen Grenzen. Es ist daher essenziell zwischen beiden Wirkungskategorien näher zu unterscheiden. Kommt es infolge eines Defektes zu sicherheitsrelevanten Beeinträchtigungen der Module wie beispielshalber einer Brandgefahr, wird der bedingungslose Austausch jener kristallinen Siliziumsolarmodule unterstellt. Kommt es hingegen zu leistungsrelevanten Beeinträchtigungen, wird unterstellt, dass nur die kristallinen Siliziumsolarmodule ausgetauscht werden, die unter die Gewährleistungs- und Garantiebedingungen der Modulhersteller fallen. Neben der zweijährigen gesetzlichen Gewährleistung, welche sowohl die Funktionalität auch das

Erscheinungsbild der Module umfasst, bietet das Gros der Modulhersteller eine freiwillige Produktgarantie sowie eine Leistungsgarantie an. Die Produktgarantie begreift dabei jedoch (meist ausdrücklich) keine optischen Mängel ohne leistungs- oder funktionsbeeinträchtigende Auswirkungen ein; sie beinhaltet nur im besonderen Maße leistungsbeeinträchtigende Mängel oder technische Makel. Die Gültigkeit dieser zusätzlichen Garantie unterscheidet sich naturgemäß von Hersteller zu Hersteller und deckt durchschnittlich einen Zeitraum von zehn Jahren nach der Modulauslieferung ab. [Sepanski *et al.* 2015] Die Leistungsgarantie der Modulhersteller bezieht sich indes nur auf Minderleistungen der Module und wird entweder in gestaffelter Form oder als lineare Leistungsgarantie gegeben. Auch hier sind die Angaben naturgemäß herstellerbedingt mannigfaltig. Die gängige Staffelung der Leistungsgarantie ist zweigeteilt: 10 Jahre nach Auslieferung werden 90 % der Ausgangsnennleistung garantierte; über einen Zeitraum von zumeist 25 Jahren eine maximale Senkung auf 80 % der Ausgangsleistung. Derweil erhalten jedoch die linearen Leistungsgarantien immer mehr Einzug in den Garantiekatalog der Modulhersteller und umfassen bereits einen Zeitraum von durchschnittlich 30 Jahren mit einer jährlichen garantierten maximalen Leistungseinbuße von 0,3 bis 0,7 %. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang neben einzukalkulierenden Leistungs- und Messtoleranzen grundsätzlich eine der Bestimmung gemäße und sachgerechte Verwendung der Solarmodule (schließt eine fachgerechte Montage und eine Installation nach der Installationsanleitung des Herstellers mit ein) als auch der in den Leistungsangaben bereits enthaltene Effekt der lichtinduzierten Degradation (kurz: LID). Dieser tritt zwar vorwiegend bei Solarmodulen auf Basis von amorphem Silizium auf (vgl. Kapitel 3.4.2: „Zellen aus amorphem Silizium“, Seite 119ff), wird aber auch in kristallinen Siliziumsolarzellen beobachtet. Der Effekt äußert sich in einem Leistungsverlust direkt nach der Modulinstallation und kann in extremen Fällen bis zu 5 % der Ausgangsleistung betragen. LID wird jedoch nicht der betrachtungsrelevanten Defektgruppe zugeordnet, da der Effekt, wie zuvor dargestellt, bereits in die herstellerseitige Leistungsgarantie mit einkalkuliert ist und nicht zum Austausch eines betroffenen Moduls führt.

Auch werden Schönheits- oder kosmetische Beeinträchtigungen, welche nach dem Ablauf der gesetzlichen Gewährleistungsfrist auftreten, aus der betrachtungsrelevanten Fehlergruppe exkludiert, da sie ebenfalls nicht zum Austausch der Module führen. Dies gilt darüber hinaus im vollen Umfang und unabhängig jeglicher Fristen für äußerliche Verschmutzungen der Module. Gleichwohl werden auch Defekte, welche ursprünglich

auf schlechte Produktionschargen zurückzuführen sind, aus der betrachtungsrelevanten Fehlergruppe ausgeschlossen, sofern keine sicherheits- oder leistungsrelevanten Beeinträchtigungen vorliegen. Hierzu zählen beispielshalber eine moderate Anzahl von Kristallfehlern bei multikristallinen Zellen oder sogenannte „Streifenringe“ bei monokristallinen Zellen. Weiter existieren einige Auswirkungen qualitativ schlechter Produktionsschritte, die mitunter vorschnell als Defekt gewertet werden. Hierzu zählen beispielshalber die in Abbildung 5-2 dargestellten bräunlichen Verfärbungen am Zellenrand. In Abhängigkeit der gewählten Verfahrensparameter und –weise können diese aus dem Transport in der Zellenherstellung während der Deposition der Antireflexionsschicht stammen und werden ebenfalls nicht zu den betrachtungsrelevanten Defekten gezählt weil nicht leistungsmindernd über die Grenzen der Leistungsgarantie hinaus.

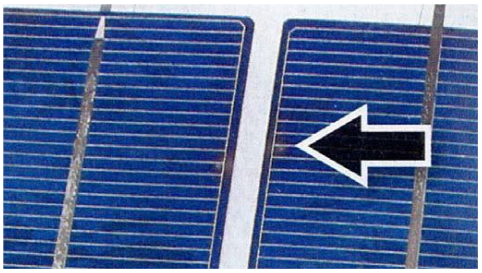


Abbildung 5-2: Bräunliche Verfärbung von Zellenrändern infolge unsauberer Produktionsschritte. Abbildung aus [Sepanski *et al.* 2015, S.11].

Zur besseren Greifbarkeit und zum Zwecke der Übersichtlichkeit sind die Defekte und / oder deren Folgewirkungen, aus denen letztlich im Rahmen der bereits beschriebenen Sachverhalte ein Austausch betroffener kristalliner Siliziumsolarmodule resultiert, in einer Liste zusammengetragen. Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und die Reihenfolge stellt keine Gewichtung jeglicher Art dar. Gleichwohl werden nicht nur generelle Defekte der gesamten Bandbreite der Photovoltaiktechnologie beschrieben, die Priorität der Auflistung liegt ausschließlich auf Defekten, die die kristalline Siliziumsolartechnologie betreffen. Zudem liegt der Fokus auf der Beschreibung der Ursache sowie möglicher Folgewirkungen der einzelnen Defekte, weshalb von einer detaillierten Diskussion der zugrunde liegenden chemischen und physikalischen Vorgänge abgesehen wird[131].

[131] Weiterführende und vertiefende Informationen zu den entsprechenden chemischen und physikalischen Vorgängen finden sich vorzugsweise in [Sepanski *et al.* 2015] als auch in allgemeiner Form in [Grundmann 2006], [Sze und Ng 2007] sowie [McEvoy 2012].

Häufig auftretende Defekte kristalliner Siliziumsolarmodule, die einen Austausch jener zeitigen, sind unter anderem:

- Adhesionsverlust der Rückseitenfolie: Die Modulrückseite inklusive Laminat besteht aus mehreren Schichten, sodass je Schnittstelle ein Adhesionsverlust ob Hitze, thermischen Schwankungen, mechanischen Belastungen, Feuchtigkeit, UV-Strahlung oder physikalischen und chemischen Stresses auftreten kann. Je nachdem, an welcher Stelle auf der Rückseite der Adhesionsverlust auftritt, ändert sich die Wahrscheinlichkeit eines Defektes. Mittig des Moduls zeitigt sich keine Sicherheits- oder Leistungsbeeinträchtigung. Problematisch ist ein Adhesionsverlust in der Umgebung der Modulanschlussdose oder an den Modulrändern. Folgen können der Eintritt von Wasser oder Feuchtigkeit sein, was ein Sicherheitsrisiko im Sinne der direkten elektrischen Verbindung zwischen Modul und Installationsunterbau darstellt, sowie das Ablösen der Modulanschlussdose und damit dem Bruch von Stringverbindern (mögliche Entstehung von Lichtbögen).
- Brandflecken als Folge von Hotspots oder Lichtbögen
- Bruch von Zellenverbindern oder Stringverbindern: prädestiniert zum Bruch der Zellenverbinder ist der Knick zur Verbindung der Oberseite einer Zelle und der Unterseite der sequenziell nachfolgenden Zelle. Die Wahrscheinlichkeit für einen Defekt einzelner Zellenverbinder steigt mit der Nähe der Zellen zueinander, da der entsprechende Knick des Verbinders strenger ausfällt. Diese bereits mechanisch beanspruchten Verbinder können dann infolge von physikalischem Stress während des Modultransportes, thermischen Schwankungen, Hotspots oder mechanischen Beanspruchungen während der Nutzungsphase brechen. Ebenfalls bruchanfällig sind qualitativ schlechte Lötstellen der Zellenverbinder auf den Zellen oder der Zellenverbinder mit dem Stringverbinder. Durch den Bruch eines Verbinders oder der entsprechenden Lötstelle können durch die Abkopplung einzelner Zellen oder ganzer Strings erhebliche Leistungseinbußen des betroffenen Moduls erfolgen oder Hotspots entstehen, die wiederum zum Glasbruch führen oder einen Brand auslösen können. Selbst wenn die Lötstellen nicht brechen, kann eine schlechte Lötqualität der Zellen- und Stringverbinder einen „versteckten“ Defekt darstellen, dessen Folgen sich erst nach einigen Jahren der Betriebsführung zeigen. Schlechte Lötstellen korrodieren allgemach, weshalb auch der elektrische Widerstand erst nach einiger Zeit ansteigt und als Folge lokale Hitzeentwicklungen auftreten.

- Defekt der Modulanschlussdose: Eine schlechte Verarbeitung des Dosengehäuses oder Fehler bei der Produktion wie eine qualitativ minderwertige Befestigung der Modulanschlussdose auf der Rückseitenfolie können zum Eintritt von Feuchtigkeit in die Dose führen. Dies hat wiederum eine schleichende Korrosion sämtlicher elektrischer Verbindungen sowie des Konnexes mit den Stringverbindern zur Folge. Weitere Defektquelle ist eine unsachgemäße Verkabelung innerhalb der Modulanschlussdose, was eine hohe Brandgefahr infolge von Lichtbögen birgt. Gleichwohl können qualitativ unzureichende Lötstelle innerhalb der Modulanschlussdose hohe Widerstände und damit einhergehend eine starke Erhitzung verursachen, was abermals eine Brandgefahr darstellt.
- Defekte Bypassdioden: Können zwar unabhängig vom Modul ausgetauscht werden, bleiben jedoch oft unerkannt. In diesem Fall führen sie zusammen mit einer partiellen Verschattung oder sonstigen Defekten auf Zellen- oder Stringebene (Zellenbruch, Bruch von Zellenverbindern oder Stringverbindern et cetera) zur Beschädigung des Moduls und äußern sich in Hotspots und Brandflecken.
- Deformation des Modulrahmens: Neben möglicher Beeinträchtigungen des Modulrahmens infolge der Transport- und Installationsprozesse kann dieser auch während der Nutzungsphase eines kristallinen Siliziumsolarmoduls beschädigt werden. Gründe sind zumeist eine unsachgemäße Wartung (falsches Betreten

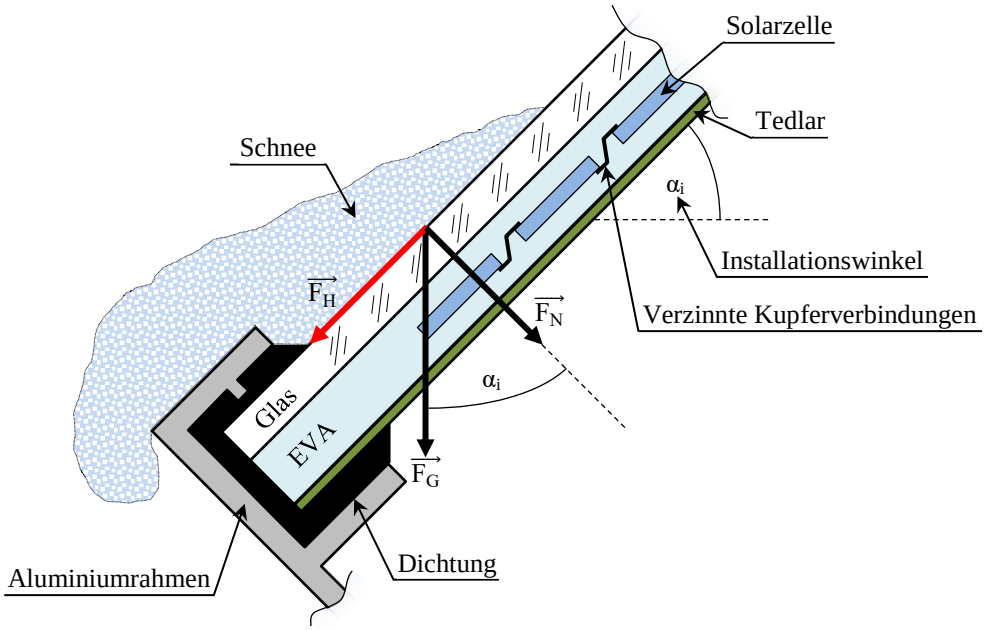


Abbildung 5-3: Druck auf die überstehende Kante des Aluminiumrahmens durch Schneelast in Abhängigkeit des Installationswinkels α_i.

der Module) oder hohe Schneelasten. Durch hohe Schneelasten entsteht auf der Modulfrontseite ein Druck auf die überstehende Kante des Aluminiumrahmens, welcher sich als Funktion des Installationswinkels α_i darstellt. Abbildung 5-3 auf der vorangegangen Seite verdeutlicht das Prinzip. Übersteigt der Druck auf die Modulkante dessen Druckfestigkeit, kann der Aluminiumrahmen nachhaltig deformiert werden. Ist der entstandene Druck so groß, dass der Rahmen gar vom Frontglas des Moduls gedrückt wird, ist das Modul als Defekt anzusehen und muss ausgetauscht werden. Im Zusammenhang mit Schneelasten ergibt sich zudem ein weiteres Problem: aus einer ungleichmäßigen Verteilung der Schneelast können hohe Verspannungen resultieren, die wiederum auf den Aluminiumrahmen wirken können (Deformation), beziehungsweise hohe Momente an den Einspannklemmen entstehen lassen. Zudem kann bei besonders hohen Schneelasten, bei einer Deformation des Modulrahmens und des damit einhergehenden Stabilitätsverlustes des Moduls sowie bei hohen Momenten an den Einspannklemmen oder infolge einer Wirkungskombination dieser drei Effekte das Modulfrontglas brechen.

- Delaminierung: Ein Adhesionsverlust kann an jeder Grenzschicht zweier Materialien innerhalb eines kristallinen Siliziumsolarmoduls auftreten. Dies betrifft die Kontaktflächen zwischen Frontglas und EVA, zwischen EVA und den Solarzellen sowie zwischen EVA und Tedlar. Die Adhesion zwischen Frontglas und Laminat kann beispielshalber aufgrund von verbliebenen Verunreinigungen in der Grenzschicht beider Materialen bedingt durch unzureichende Reinigungsprozesse der Glasoberfläche vor der Laminierung verloren gehen und zur Delaminierung führen. Weiter kann eine Delaminierung jedweder Schichten auch aus den verschiedensten Umwelteinflüssen und deren Kombination (beispielshalber Versprödung der Materialien) sowie aus Hotspots resultieren. Als Folge einer Delaminierung kann Feuchtigkeit in das Modul eindringen und zu Korrosion führen. Findet eine Delaminierung auf der lichtzugewandten Seite des Moduls von zwei Materialschichten zwischen photoaktiver Komponente (Solarzelle) und Frontglas statt, können zudem Leistungseinbrüche des betroffenen Moduls ob optischer Reflexionen an den Grenzschichten resultieren. Eine Delaminierung der Rückseitenfolie ist gleichbedeutend mit allen bereits beschriebenen negativen Effekten des Listenpunktes zum Adhesionsverlust der Rückseitenfolie.

- Glasbruch: Der Bruch des Frontglases als solches führt allgemach zu einem Leistungsverlust der Module. Grund ist eine fortschreitende Korrosion der Zellen und elektrischen Verbinder infolge des Eindringens von Sauerstoff und Wasserdampf. Gleichwohl zieht ein Bruch des Frontglases erhebliche sicherheitstechnische Mängel nach sich, da die elektrische Isolation der Module nicht mehr gewährleistet ist; besonders bei feuchten Bedingungen. Weiter kann Glasbruch Hotspots zeitigen, was letztlich mit einer Überhitzung der betroffenen Module einhergeht.
- Potenzial induzierte Degradation (kurz: PID): PID führt zu einem niederohmigen elektrischen Widerstand in kristallinen Siliziumsolarzellen. Je höher die Degradation fortgeschritten ist, desto stärker ist die Erwärmung der Zellen aufgrund des entstandenen elektrischen Widerstandes. So kann PID neben einer Leistungseinbuße der betroffenen Zellen und damit des jeweiligen Moduls in extremen Fällen Hotspots und Korrosion zeitigen, was wiederum eine Brandgefahr darstellt oder zur Delaminierung zwischen Solarzelle und EVA inklusive sämtlicher damit einhergehender negativer Effekte führen kann. Wenngleich PID einen teilweise reversiblen Defekt darstellt, ist er schwierig zu detektieren bevor sich Folgedefekte äußern.
- „Schneckenspuren“: Sind mit bloßem Auge erkennbare bräunliche Verfärbungen des Kontaktgitters von kristallinen Siliziumsolarzellen, die mittels des Siebdruckverfahrens hergestellt wurden. Diese Verfärbungen entstehen größtenteils einige Monate nach der Inbetriebnahme kristalliner Siliziumsolarmodule und breiten sich in zufälliger Richtung quer über das Modul aus; meist entlang von Mikrorissen und Zellenbrüchen. Die Bezeichnung „Schneckenspuren“ resultiert aus dem Erscheinungsbild des Effektes, der sich rein äußerlich darstellt, als wären Schnecken quer über das Modul gewandert. Allerdings liegt die Verfärbung nicht an der Oberfläche des Moduls vor, sie findet zwischen Solarzelle und EVA infolge einer Einlagerung von elementaren Silberpartikeln aus dem Kontaktgitter der Zelle in die darüber liegende EVA-Schicht statt. [Meyer *et al.* 2014] Wenngleich den Verfärbungen an sich bislang weder sicherheitsrelevante- noch leistungsrelevante Beeinträchtigungen nachgewiesen werden konnten, fallen betroffene Solarmodule meist in den Zeitraum der gesetzlichen Gewährleistungspflicht und sind sonach im Sinne der Abfallprognose als defekt anzusehen weil auszutauschen. Weiter verlaufen die „Schneckenspuren“ fast ausschließlich

entlang von Mikrorissen, weshalb sie letztendlich auch ein optischer Indikator, beziehungsweise eine Folgeerscheinung dieses Defektes sind. Speziell Mikrorisse zeitigen verschiedene negative Auswirkungen, welche im entsprechenden Listenpunkt konkretisiert werden. Das Phänomen der „Schneckenspuren“ wurde erst in den letzten paar Jahren bekannt. Nach [Battistutti 2013] sind zudem vordergründig Module schlechtere Materialqualitäten und geringer mechanischer Stabilitäten betroffen. Dies ist insofern richtig, als dass schlechtere Materialqualitäten und schwache mechanische Stabilitäten von Modulen Mikrorisse und Zellenbrüche begünstigen.

- Verfärbung der EVA-Schicht: stellt vorwiegend ein ästhetisches Problem dar und führt nur okkasionell zum Austausch betroffener Module. Zugleich liefert eine Verfärbung der EVA-Schicht zwischen photoaktiver Komponente und Modulfrontglas auch einen geringen Beitrag zum stetigen Leistungsverlust kristalliner Siliziumsolarmodule.
- Versprödung: Infolge niedriger Temperaturen und häufiger Temperaturschwankungen sowie der Einwirkung von UV-Strahlung können Materialien wie die Dichtung zwischen Aluminiumrahmen und Laminat allgemach verspröden und beispielshalber die Druckfestigkeit der Modulrahmung gegen Schneelasten reduzieren.
- Zellenbruch und Mikrorisse: Prinzipiell sind auf Ebene kristalliner Siliziumsolarzellen die Bezeichnungen Zellenbruch und Mikroriss gleichbedeutend. In toto handelt es sich um eine Bruchzone in der Zelle, die zumeist mit bloßem Auge nicht erkennbar ist; daher die Bezeichnung Mikroriss. Der Ausdruck Zellenbruch kann in diesem Zusammenhang leicht irreführend sein, da eine Bruchzone in der Zelle nicht gleichbedeutend mit einem gänzlichen Bruch der Zelle ist. Die Bruchzonen können in Richtung und Länge stark variieren, wobei ihre Entstehung sowohl in der gesamten Produktionssequenz (von der Waferfertigung bis zur Rahmung der Module) als auch im Transport und der Installation der kristallinen Siliziumsolarmodule sowie in der Nutzungsphase der Module zu finden ist; die Quellen sind mannigfaltig. Die Ursache liegt hingegen zumeist in einer mechanischen Beanspruchung der Wafer, Zellen oder Module. Gleichwohl können thermische Schwankungen oder extreme Temperaturen eine Ursache darstellen. Liegt ein Riss, unabhängig der Ursache, in einer Zelle vor, kann dieser sich während der Nutzungsphase des Moduls ob mechanischen Stress (durch Wind,

Schneelast, Betreten während Wartungsarbeiten et cetera) sowie thermischen Stress (Temperaturschwankungen) ausbreiten. Je nach Ausprägung, Verästelung und Lage der Bruchzone können als Folge ganze Zellenbereiche inaktiviert werden. Inaktive Zellenbereiche tragen nicht mehr zum Gesamtoutput des Moduls bei. Für das definierte $gSSM_{sc/mc}$ gilt in diesem Zusammenhang folgende Faustformel: inaktiviert der Riss eine Zellenfläche von mehr als 8 % der betroffenen Gesamtzelle führt er mit steigender Fläche zu einem linearen Leistungsverlust der Zelle. Sollte die inaktive Fläche mehr als 50 % der gesamten Zellenfläche betragen, wirkt sich das in einem Leistungsverlust des Moduls von 1/3 aus, da die für diesen String verantwortliche Bypassdiode den gesamten String überbrückt. Gleichwohl können inaktive Zellenbereiche, welche sich in einem String befinden, der nicht durch die entsprechend zugehörige Bypassdiode deaktiviert wurde, zu Hotspots und Brandflecken führen. Eine sichtbare Auswirkung von Bruchzonen in einer Solarzelle sind die bereits benannten „Schneckenspuren". [Sieg 2015] gibt hierzu ein prägnantes Praxisbeispiel, in dem sich die ursprünglichen Mikrorisse vergrößert und zu Kontaktierungsproblemen geführt haben. Als Folge ergaben sich Hotspots. Diese führten punktuell zu so einer extremen Erhitzung, dass auf der Rückseitenfolie der betroffenen Module sowohl Blasen entstanden als auch Teile verschmorten beziehungsweise verbrannten.

Zusätzlich zur vorangegangenen Beschreibung der Defektarten findet sich im Anhang 5-1 eine tabellarische Zusammenfassung aller aufgeführten Defekte, geordnet nach Detektionsmethode. Diese Übersicht beinhaltet dieserhalb auch eine optische Darstellung der Schadensbilder (nach und mit Erlaubnis von [Köntges 2014] und [Battistutti 2013]), wie sie sich in der entsprechenden Detektionsmethode (optische Kontrolle, Thermografie, Elektrolumineszenz und UV-Fluoreszenz) äußern.

Eine Beschädigung korrekt installierter kristalliner Siliziumsolarmodule kann jedoch auch durch weitere und der bisherigen Klassifikation nicht zuordenbare Ursachen erfolgen. Diese sind unabhängig etwaig vorhandener Materialschwächen und fehlender Produktionsqualität sowie externer Effekte wie eine hypertrophe und unzulässige mechanische oder thermische Beanspruchung. Weiter können sie über die gesamte Lebensdauer eines Solarmoduls, wenn auch nur okkasionell, auftreten, wobei sich der Zeitpunkt als vollkommen imponderabel darstellt. Dazu zählen Wetterphänomene wie Blitzeinschlag und extremer Hagel, Schäden durch Tiere sowie Vandalismus.

Wenngleich diese Schadensursachen in ihrer Ausprägung nicht zwangsläufig einen Austausch betroffener Module zeitigen weil mitunter reparabel, können sie je nach Schadensbild einen Beitrag zum betrachtungsrelevanten Stoffstrom leisten. Aus der Betrachtung ausgeschlossen werden hingegen externe Effekte wie Diebstahl oder Hausbrände, da betroffenen Solarmodule nicht dem Recycling zugeführt werden können.

Obschon die Beschreibung der Defekte, welche betroffenen kristallinen Silizium-solarmodulen in der Konsequenz die Abfalleigenschaft attribuieren, die theoretische Grundlage zur Generierung des betrachtungsrelevanten Stoffstroms aus Altmodulen darstellt, ist die Frage nach der Wahrscheinlichkeit und dem Zeitfenster des Eintritts der spezifischen Defektarten sowie deren Kombination für die letztlich angestrebte mengen-basierte Prognose des Aufkommens an Altmodulen essenziell und wird dieserhalb nachstehend separat diskutiert. Hierfür wird zuvörderst nochmals darauf hingewiesen, dass der gesamte, für ein Recycling von Photovoltaikmodulen zur Verfügung stehende Abfallstrom nach dem Produktionsprozess ausschließlich aus schadhaften $gSSM_{sc/mc}$ per Definition besteht. Diese schadhaften oder defekten Solarmodule unterscheiden sich zwar in der Defektart, rein stofflich sind sie jedoch identisch. Weiter ist für die folgenden Betrachtungen die zugrunde liegende Kristallqualität irrelevant, weshalb im Sinne einer klaren Diktion und einer eindeutigen Kennzeichnung nachstehend Altmodule, denen die Abfalleigenschaft obliegt, mit $gSSM_{alt}$ abgekürzt werden.

Die zur Darstellung und Diskussion der Wahrscheinlichkeit und dem Zeitfenster der spezifischen Defektarten benötigte Datenbasis stellt sich indessen als unbefriedigend dar. Dies gilt ingleichen für die hierfür verfügbare Literatur besonders in quantitativer, aber auch in qualitativer Hinsicht. Wenngleich nur eine unzureichend geringe Anzahl an Autoren eine Abfallprognose in die Problematik des PV-Modulrecyclings inkludiert, reduziert sich die Zahl der tatsächlich qualitativ hochwertigen Analysen auf ein Mindestmaß. Beispielshalber blenden einige Autoren bei der Prognose des Abfall-aufkommens in Form von $gSSM_{alt}$ die verantwortlichen Defektarten vollkommen aus und simplifizieren mitunter so die Prognose auf eine unbegründete Lebensdauer der Module von durchschnittlich 20 Jahren. Dies trifft leider auf das Gros der verfügbaren Quellen zu, weshalb die meisten Statistiken vereinfachend das Abfallaufkommen mit dem Installationsvolumen um 20 Jahre verschoben gleichsetzen; folglich das in diesem Unterkapitel diskutierte Aufkommen aus Transport- und Installationsschäden sowie infolge von Defekten während der gesamten Nutzungsphase eines Moduls vernachlässigt

und aus der Betrachtung exkludiert wird. Auch wenn dieser Zustand und die Quantität der verfügbaren Literatur teilweise dem jungen Forschungsfeld geschuldet sind, genügt dies jedoch nicht dem Anspruch der vorliegenden Arbeit, weshalb sich auf die wenigen Quellen, die eine ausreichende Datenqualität sowie eine begründete und für die Abfallprognose konstruktive Methode aufweisen, bezogen wird. Für die nachstehenden Betrachtungen dienen sonach vor allem die Arbeiten von [DeGraaff *et al.* 2011], [Köntges *et al.* 2014], [Sander *et al.* 2004], [Hasselbrink *et al.* 2013], oder um Herrn Reil wie [Sepanski *et al.* 2015] beziehungsweise weitere Veröffentlichungen von Institutionen wie dem TÜV Rheinland, Fraunhofer ISE und Task 13 der IEA PVPS, welche an gegebener Stelle spezifiziert werden, als Daten- und Diskussionsgrundlage. Hinzu kommen Aussagen und persönliche Mitteilungen von Experten, welche gleichwohl an geeigneter Stelle aufgeführt werden.

Die in diesem Unterkapitel eingangs thematisierten Transport- und Installationsschäden können, wie bereits diskutiert, sowohl mit bloßem Auge feststellbare als auch „versteckte“ Defekte beziehungsweise Folgeschäden zeitigen. Für die anstehenden Betrachtungen wird hierfür unterstellt, dass die augenscheinlichen Defekte bereits während der Analgeninstallation entdeckt und behoben werden; betroffene Module werden folglich erst gar nicht in Betrieb genommen. Der adäquate Austausch der betroffenen Module erfolgt unmittelbar. Die auf diese Weise anfallenden $gSSM_{alt}$ liefern zwar einen Beitrag zum für ein Recycling von Photovoltaikmodulen verfügbaren Abfallstrom, werden aber in den Statistiken zu den installierten Kapazitäten nicht berücksichtigt, da sich sonst ein Doppelbeitrag ergeben würde. Die zur Prognose des betrachtungsrelevanten Abfallstroms zugrunde liegende Gesamtheit der installierten Kapazitäten wird sonach nicht durch die vor der Inbetriebnahme ausgetauschten $gSSM_{alt}$ beeinflusst. Gleiches soll ferner für die aus den Transport- und Installationsschäden hervorgehenden „versteckten“ Defekte beziehungsweise Folgeschäden Geltung besitzen, mit der Einschränkung, dass sich ein Austausch der entsprechenden Module erst nach Nutzungsbeginn, mit der Defekt- oder Folgedefektfeststellung, zuträgt. Wie bereits dargelegt, können sich Folgedefekte oder „versteckte“ Defekte aus Transport- und Installationsschäden in ihrem Schadensbild mit Defekten, welche während der Nutzungsphase entstehen, gleichen. Es ist folglich zum Zeitpunkt der Defektfeststellung mitunter nicht nachvollziehbar, ob der spezifische Defekt auf Transport- und Installationsschäden zurückzuführen ist. Dieser fließende Übergang nicht umgehend detektierter weil nicht

mit bloßem Auge erkennbarer Defekte aus Transport- und Installationsschäden bedingt deren statistische Zuschreibung in die Gruppe der „Kinderkrankheiten“ (Defekte, die einen Austausch der Module innerhalb der ersten beiden Jahre nach deren Installation zeitigen). Die zeitraumabhängige Abgrenzung dieser Gruppe auf zwei Jahre nach der Installation orientiert sich an der gesetzlichen Gewährleistungspflicht der Modulhersteller, da diese beispielshalber auch optische Mängel mit einschließt. Dementsprechend werden Defekte, die nach dem Zeitraum der Kinderkrankheiten einen Austausch betroffener Module zeitigen, ebenfalls in zeitraumabhängige Gruppen eingeteilt. Diese Einteilung folgt dabei der bisherigen Logik und greift die bereits dargelegte gängige Struktur der herstellerseitigen Gewährleistungs- und Garantiebedingungen auf. Sonach wird der Zeitraum für etwaig auftretende Defekte im Anschluss an die Kinderkrankheiten nochmals unterteilt. Auf den Zeitraum der Kinderkrankheiten folgt die Gruppe der Defekte im Zeitraum der freiwilligen Produktgarantie; ergo dem Zeitraum zwischen zwei bis zehn Jahren nach der Anlageninstallation. Daran schließt sich letztlich eine zeitlich offene Gruppe bis zum Erreichen der technischen Lebensdauer (im nachstehenden Kapitel 5.2.1.3 diskutiert) an.

Nach [Köntges *et al.* 2014] zeigen kristalline Siliziumsolarmodule durchschnittlich die in Abbildung 5-4 auf der nachfolgenden Seite dargestellte prozentuale Verteilung der Defektarten, die im definierten Zeitraum von zwei Jahren nach der Anlageninstallation einen Austausch betroffener Module nach sich ziehen. Demnach geht ein Großteil der Reklamationen während der gesetzlichen Gewährleistungspflicht auf optische Mängel und überbordende Leistungseinbußen sowie Defekte der Anschlussdosen und der Verkabelung (inkludiert defekte Bypassdioden) zurück. Daran schließen sich der Bruch des Frontglases und Brüche der Zellenverbinder mit jeweils 10 % an, gefolgt von Deformationen des Modulrahmens, Delaminierung und nicht klassifizierten Defekten (hierzu zählen Blitzschlag, extreme Wetterbedingungen, Vandalismus et cetera). Bei den angegeben Werten zu den Defekten infolge von Transport- und Installationsschäden ist zu beachten, dass nur eindeutig zuordenbare „versteckte“ Defekte beitragen. Der tatsächliche prozentuale Anteil an „versteckten“ Defekten aus Transport- und Installationsschäden fällt in der Realität entsprechend höher aus, da Folgedefekte wie Glasbruch, Schäden an der Anschlussdose et cetera zwar eigens klassifiziert sind, dennoch ihre Ursache in Transport- und Installationsschäden haben können.

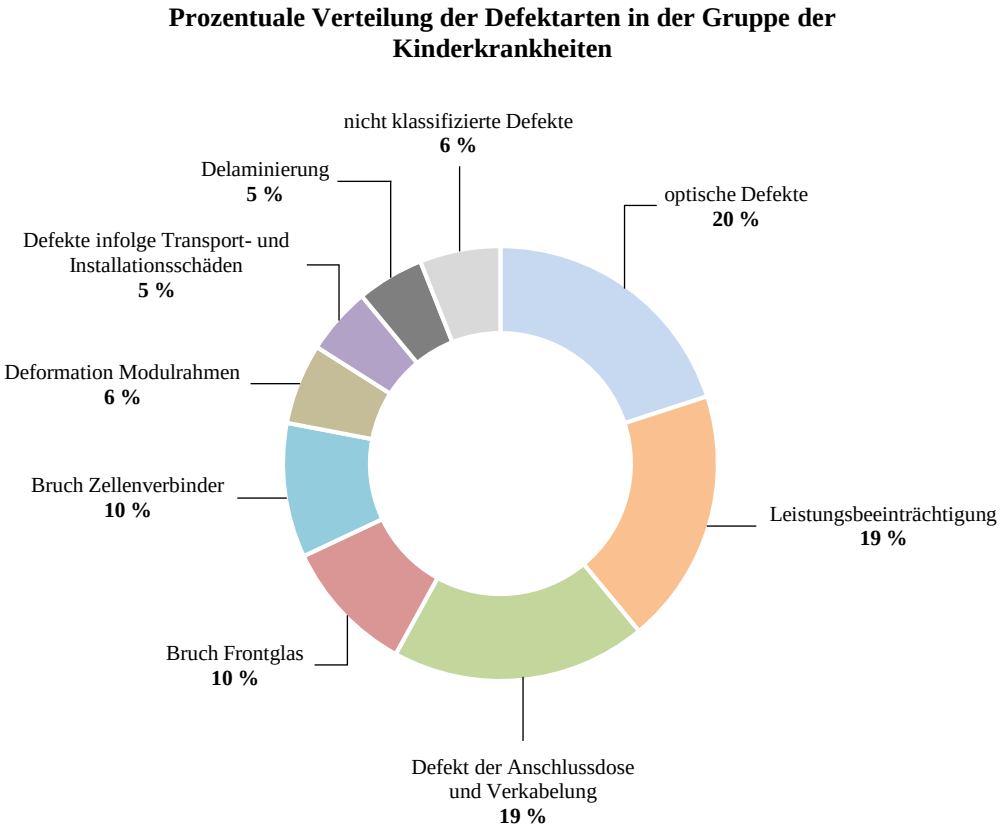


Abbildung 5-4: Prozentuale Verteilung der spezifischen Defektarten, die einen Modulaustausch im Zeitraum bis zwei Jahre nach der Anlageninstallation zeitigen. Daten nach [Köntges *et al.* 2014].

Die verwendeten Daten aus [Köntges *et al.* 2014] beziehen sich auf Reklamationsfälle von über zwei Millionen ausgelieferten kristallinen Siliziumsolarmodulen eines deutschen Vertreibers im Zeitraum von 2006 bis 2010. Laut [Richter 2011], auf den die ursprüngliche Untersuchung zurückgeht, zeigt sich eine Reklamationsrate von circa 0,5 % der ausgelieferten Module innerhalb der ersten beiden Jahre nach deren Installation. Die Angaben beziehen sich zudem auf eine Produktionspalette von zehn verschiedenen Herstellern.

Eine verschobene Defektverteilung zeigt sich für die Gruppe der Defekte im Zeitraum zwischen zwei bis zehn Jahren nach der Anlageninstallation. Laut [DeGraaff *et al.* 2011] zeigten kristalline Siliziumsolarmodule von 21 verschiedenen Herstellern nach acht Jahren Betrieb durchschnittlich die in der Abbildung 5-5 auf der nächsten Seite dargestellte Defektverteilung. Rund 1/3 der gesamten auftretenden Defekte sind auf Schäden am Laminat durch Defekte der modulinternen elektrischen Verschaltung wie eine punktuelle Verfärbung der EVA-Schicht oder Brandflecken ob schlechter Löt-qualität oder Defekte der Zellenverbinder und daraus resultierenden hohen Temperaturen zurückzuführen. Ein weiteres Drittel entfällt auf Silikonrückstände am Modulfrontglas

und Bruch des Frontglases. Defekte der Anschlussdose tragen 12 %, Schäden der Solarzellen selbst 10 % und Defekte an der restlichen EVA-Schicht inklusive Delaminierung 9 % bei. Optische Defekte, welche in der vorhergehenden Gruppe den größten Anteil der Reklamationsgründe stellten, sind in der Statistik nicht enthalten. Dies begründet sich darin, dass sie, wie bereits dargelegt, nicht unter die herstellerseitigen Gewährleistungs- und Garantiebedingungen fallen, sofern sie keine erheblichen leistungs- oder funktionsbeeinträchtigende Auswirkungen haben. Gesamtheitlich sollen laut [DeGraaff *et al.* 2011] kumuliert rund 0,5 % der Module nach 9 Jahren Betrieb die Leistungsgarantie der Hersteller ob der aufgeführten Defekte nicht erfüllen; nach 12 Jahren betrifft das bereits knapp 0,7 % der Module und nach 15 Jahren 0,9 % der Module.

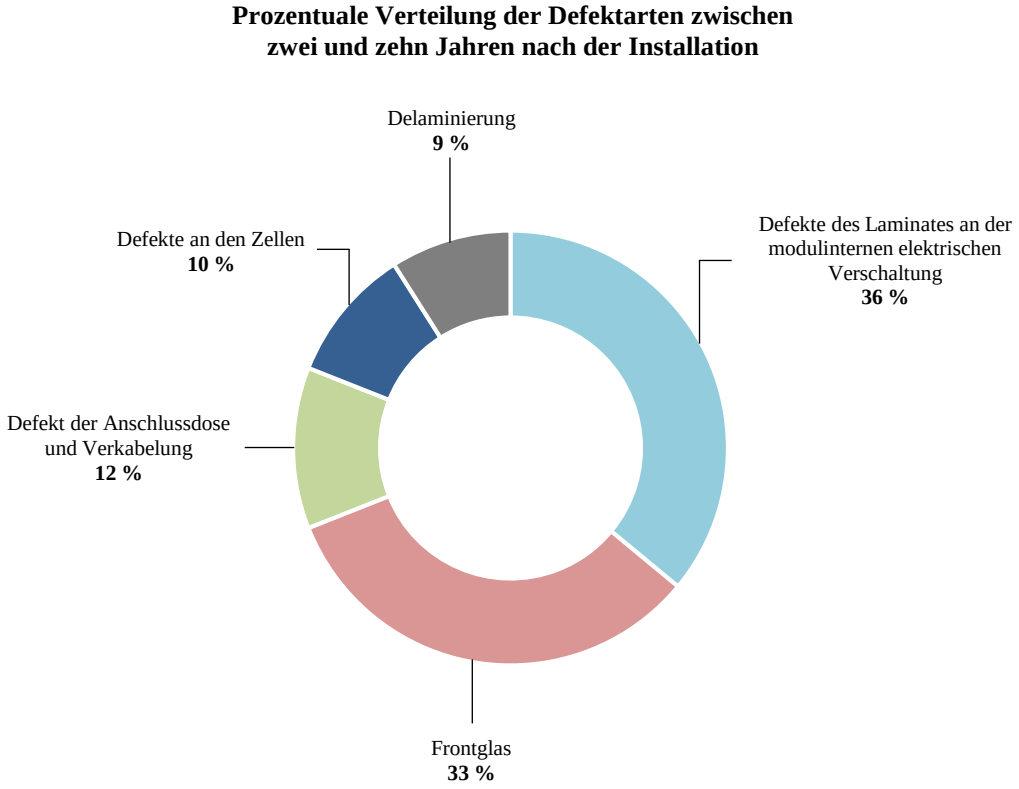


Abbildung 5-5: Prozentuale Verteilung der spezifischen Defektarten, die einen Modulaustausch im Zeitraum zwischen zwei und zehn Jahren nach der Anlageninstallation zeitigen. Daten nach [DeGraaff *et al.* 2011].

In [Hasselbrink *et al.* 2013] findet sich eine weitere Studie zur Verteilung der Defektarten bereits installierter Solarmodule. Gegenstand der Untersuchung ist zwar eine große Anzahl von kristallinen Siliziumsolarmodulen (3,4 Millionen) mit einem Durchschnittsalter von 4,9 Jahren, jedoch nur von einem Hersteller. Die darin aufgeführte Defektverteilung kann sonach die Folge eines herstellerspezifischen Designproblems sein, oder ist womöglich auf spezielle herstellerseitige Produktionsschwächen und schlechte

Materialauswahl zurückführen. Weiterhin ist zu beachten, dass den Angaben zur Defektverteilung keine Zeitachse zugeordnet ist. Sonach können die aufgeführten Defekte sowohl kurz nach der Installation der Module, oder am Ende des Untersuchungszeitraumes von jenen 4,9 Jahren aufgetreten sein. Die Ergebnisse der Untersuchung stellen folglich einen Übergang der in dieser Arbeit getroffenen Unterteilung in Kinderkrankheiten und den Zeitraum bis 10 Jahren nach der Installation dar (können keinem der beiden definierten Zeiträume zugeordnet werden) und finden sich in untenstehender Abbildung 5-6 zusammengefasst.

Prozentuale Verteilung der Defektarten bis 4,9 Jahre nach der Installation

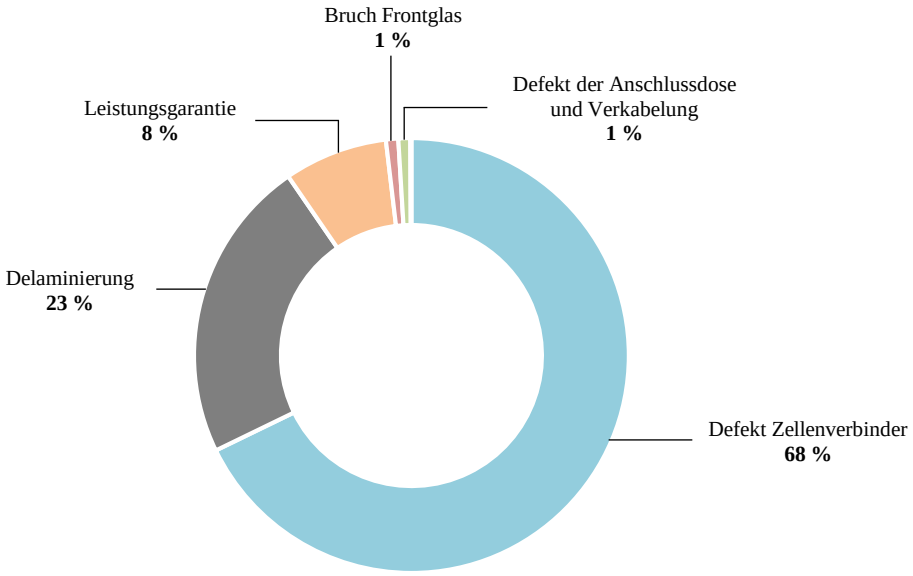


Abbildung 5-6: Prozentuale Verteilung der spezifischen Defektarten, die einen Modulaustausch nach bis zu 4,9 Jahren nach der Anlageninstallation zeitigen. Daten nach [Hasselbrink *et al.* 2013].

Der enorme Anteil defekter Zellenverbinder an der Gesamtverteilung ist ein starkes Indiz für die aufgestellte Behauptung einer herstellerspezifischen Problematik; eine Anwendung auf die breite Basis installierter kristalliner Siliziumsolarmodule ist dieserhalb nicht tragbar. Die Angaben der Abbildung 5-6 sollen jedoch an anderer Stelle dieses Kapitels nochmals aufgegriffen werden und Verwendung finden.

Welche Defekte vermehrt ab zehn Jahren nach der Modulinstallation auftreten, ist bislang schwierig zu beantworten. Der Grund dafür ist sowohl im jungen Forschungsfeld als auch dem erst Mitte der 2000er gelungenem Durchbruch der Solartechnologie auf dem terrestrischen Markt für erneuerbare Energien zu finden. Es gibt diesbezüglich schlicht kaum Erfahrungswerte beziehungsweise geeignete Untersuchungen und dem-

entsprechend verfügbare Literatur. Einen ersten Anhaltspunkt liefert [Köntges *et al.* 2014], worin sich auf eine Studie von 272 Photovoltaikmodulen drei verschiedener Hersteller mit einer Betriebszeit von jeweils mehr als 15 Jahren berufen wird. Hauptdefekt stellt die Delaminierung einzelner Schichten dar, gefolgt von Bruchzonen in den Zellen und Verfärbungen der Laminatschicht. Abbildung 5-7 verdeutlicht die Ergebnisse, wobei jedes Modul mehr als nur einen Defekt aufweisen kann.

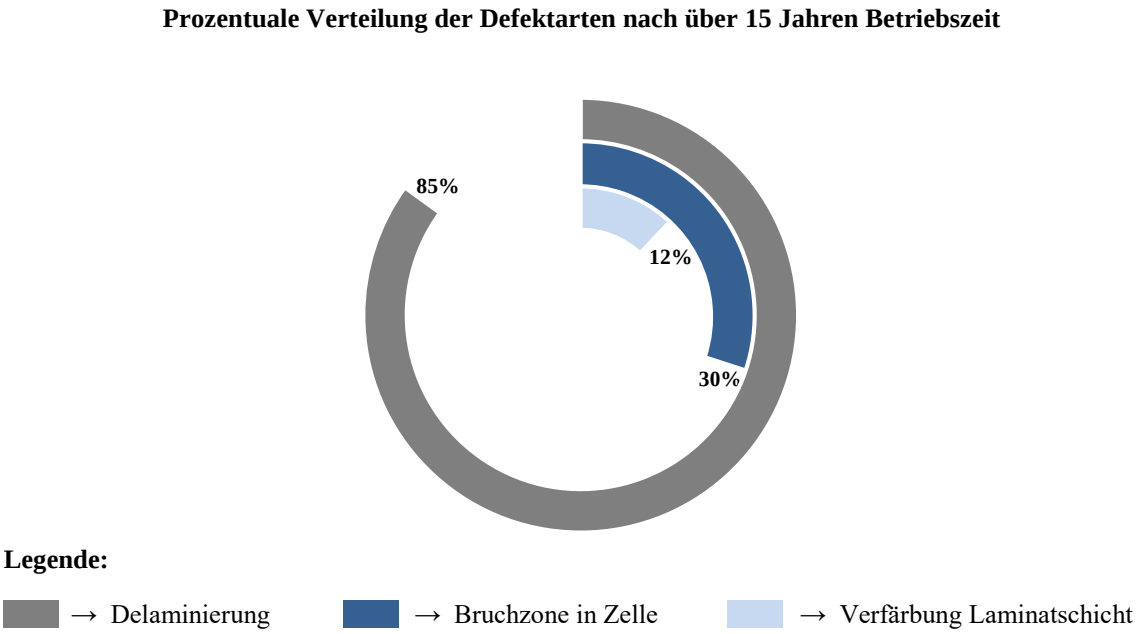


Abbildung 5-7: Defekte an 272 Photovoltaikmodulen nach über 15 Jahren Betriebszeit. Daten nach [Köntges *et al.* 2014].

Neben der geringen Anzahl untersuchter Module ist ein weiteres Manko der Stichhaltigkeit der Angaben in den untersuchten Modulen selbst zu finden. Diese unterscheiden sich von heutigen Modulen wie beispielshalber vom definierten $gSSM_{sc/mc}$ sowohl im Aufbau der Zellen- und Modulkonzeption (vergleich hierzu Kapitel 3.3: „Evolution der kristallinen Siliziumsolarzelle“), den verwendeten Materialien, als auch in den zugrunde liegenden Produktionsprozessen. Laut [Köntges *et al.* 2014] beinhalteten die betrachteten Photovoltaikmodule noch ein Laminatmaterial, was in heutigen Modulen keine Anwendung mehr findet, dessen Eigenschaften aber schließlich für die hohen Defektwerte der Delaminierung und der Verfärbung verantwortlich sind. Dies führt dazu, dass die Angaben nicht repräsentativ für neuinstallierte $gSSM_{sc/mc}$ sind. Allerdings stellt die Studie eine der wenig verfügbaren Quellen für den betrachteten Zeitraum dar. Eine wesentliche Erkenntnis dieser Untersuchung ist, dass nahezu alle Module trotz der ausgewiesenen Defekte die herstellerseitige Leistungsgarantie erfüllen. Eine weitere

verfügbare Studie zu Langzeitdefekten findet sich in [Bombach *et al.* 2006]. Zwar ist der Probenumfang dieser Studie bezüglich der Detektierung von Defekten mit etwas mehr als 3500 Modulen größer, das Alter der untersuchten Module jedoch auch. Es handelt sich dabei um Photovoltaikmodule, welche 1983 installiert und 2006 untersucht wurden. Alleinig technische Daten wie Abmessung und Gewicht der Module (56 cm x 46 cm x 1,2 cm; 3,8 kg je Modul), Anzahl an Zellen je Modul (20 multikristallinen Siliziumsolarzellen je Modul) und die Dimensionierung der verwendeten Solarzellen (10 cm x 10 cm x 0,04 cm) zeigen deutlich die Abweichungen zu „modernen“ Modulkonzeptionen. Neben der Ablösung der Modulverbindungskabelisolierung und dem Bewuchs der Modulfrontgläser mit Flechten und Moos, zählen zu den Hauptdefekten Glasbruch (circa 32 % der Module), Bruch der Zellenkanten im Laminatverbund (rund 20 % der Module betroffen) und Delaminierung (knapp 8 %). Es zeigt sich besonders an der Defektart der Delaminierung ein erheblicher Unterschied zur vorherig diskutierten Studie von [Köntges *et al.* 2014], was neben der bereits getroffenen Kritik mannigfaltige Ursachen haben kann.

Wenngleich beide Studien eine Verteilung der verschiedenen detektierten Defektarten angeben, beinhalten sie keine konkreten Informationen zu resultierenden Ausfallraten betroffener Module aus betrachtungsrelevanter Sicht. Dem Gegenüber lässt das Ergebnis beider Studien ([Köntges *et al.* 2014] und [Bombach *et al.* 2006]), dass nahezu alle untersuchten kristallinen Siliziumsolarmodule die herstellerseitige Leistungsgarantie trotz der vorgefundenen Defekte erfüllen[132], weitere Ableitungen zu. Sonach tragen selbst Module einer mittlerweile „veralteten“ Konzeption mit hohen Laufzeiten im Normalbetrieb kaum zum für ein Recycling von Photovoltaikmodulen verfügbaren Stoffstrom bei. Zwar weisen die untersuchten Module einige Defekte auf, diese fallen aber nach über zehn Jahren Betriebszeit nicht unter die Garantiebedingungen weil nicht leistungsmindernd in ausreichendem Maße. Additional ist davon auszugehen, dass heutige Module ob besserer Produktionsprozesse, fortschrittlicherer Materialien und einer feineren Fehlererkennung (auch während der Fertigung) ein wesentlich geringes neuralgisches Verhalten aufweisen und dieserhalb besonders nach einer langen Betriebszeit von beispielshalber mehr als 15 Jahren einen noch kleineren Beitrag zum betrachtungsrelevanten Abfallstrom leisten (ausgenommen etwaige okkasionell und im Zeitpunkt

[132] Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Langzeitstudien für andere Modulkonzeptionen (Dünnschicht, Glas-Glas et cetera). Eine besonders detaillierte Studie diesbezüglich findet sich beispielshalber in [Pozza and Sample 2015] oder [Polverini *et al.* 2013].

imponderabel auftretende externe Einflüsse wie extreme Witterungsbedingungen, unsachgemäße Wartungs- und Reinigungsarbeiten oder Vandalismus). Diese Behauptung in Verbindung mit der Evolution der nationalen und regionalen jährlichen Neuinstallationen nach Kapitel 4.2 hat für die angestrebte Abfallprognose einen essenziellen Charakter und soll deshalb nachfolgend substanziiert werden.

Hierfür bietet sich eine Studie des TÜV Rheinlands an, in der über einen Zeitraum von elf Jahren die Durchfallquoten geprüfter Photovoltaikmodule durch die technologiespezifischen standardisierten Prüfverfahren[133] IEC 61215 für kristalline Module und IEC 61646 für Dünnschichtmodule ermittelt wurden. Mit Blick auf die kristalline Siliziumsolartechnologie führte der konsequente Einsatz des entsprechenden Prüfverfahrens und die gewonnene Akzeptanz in der Industrie über die letzten zwei Dekaden zu einer Reduzierung der Ausprägung und der Eintrittshäufigkeit sowie einer teilweisen Auslöschung einzelner Kinderkrankheiten, da die Prüfsequenz die dafür verantwortlichen Schwächen der Module identifiziert. Laut der betreffenden Studie [TÜV Rheinland 2014] zeitigt die gewonnen Akzeptanz in der Industrie eine an die Anforderungen der Prüfsequenz angepasste Konstruktion der Photovoltaikmodule. Zudem resultieren aus den gewonnenen Erkenntnissen der spezifischen Prüfverfahren auch widerstandfähigere Modulkonzeptionen hinsichtlich der Defektanfälligkeit bei längeren Nutzungsdauern. Nachstehende Abbildung 5-8 zeigt die Ergebnisse aus [TÜV Rheinland 2014] bezüglich der Durchfallquoten kristalliner Siliziumsolarmodule zwischen 2007 und 2013.

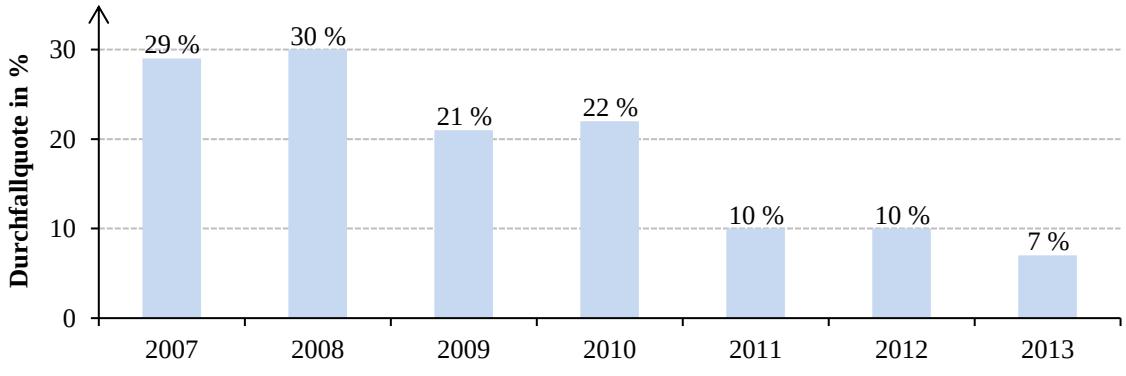


Abbildung 5-8: Jährliche Durchfallquoten kristalliner Siliziumsolarmodule durch die Prüfsequenz nach IEC 61215 für die Jahre 2007 bis 2013. Daten nach [TÜV Rheinland 2014].

[133] Bereits in den Kapiteln 4.5.1.1: „Modulbestandteile und Konzeption“ sowie 4.5.5: „Fertigung Standardsolarmodul“ erwähnt. Beide Prüfverfahren finden sich mit ihrer Testsequenz in [TÜV Rheinland 2010].

Wie der Abbildung 5-8 zu entnehmen ist, reduzierte sich die Durchfallquote kristalliner Siliziumsolarmodule von 29 % im Jahr 2007 auf 7 % im Jahr 2013. Dies ist sowohl auf die Anpassungen der Modulkonzeptionen an die Erkenntnisse aus der Prüfsequenz als auch auf einen steten Lerneffekt in der Produktion in Verbindung mit dem Einsatz fortschrittlicher Materialien zurückzuführen. Die Prüfsequenz nach IEC 61215 beinhaltet zudem eine Testprozedur, deren Ergebnisse signifikant für das Langzeitverhalten und die Qualität des Laminates sind: den sogenannten Feuchte-Hitze-Test (abgekürzt mit DHT aus dem Englischen für: „damp heat test“). Die diesbezüglichen Durchfallquoten sanken laut [Köntges *et al.* 2014] ebenfalls, was eine Reduzierung der Defektart Delaminierung auch im langfristigem Betrieb erwarten lässt.

Eine weitere Fundierung der zu substanziierenden Behauptung findet sich in der bereits andiskutierten Studie um Herrn Hasselbrink. Neben den in Abbildung 5-6 dargestellten Ergebnissen und der zugehörigen Diskussion wurden in [Hasselbrink *et al.* 2013] zusätzlich eine Flotte von mehr als acht Millionen jüngerer kristalliner Siliziumsolarmodule mit einem Durchschnittsalter von 2,1 Jahren untersucht. Obschon der bereits dargelegten herstellerseitigen Problematik keine generellen Aussagen mittels der enthaltenen Daten möglich sind, unterstreicht der Vergleich beider studieninternen Untersuchungsgruppen die angedeutete Tendenz. Sonach reagierte der Hersteller auf die spezifische Defektanfälligkeit mit der Anpassung der Produktionssequenz, der verwendeten Materialien und der Modulkonzeption. Im Ergebnis wurde eine Reduzierung der prozentualen Abundanz der Defektgruppen um knapp das 100-Fache gegenüber der Vergleichsgruppe mit einem 4,9-jährigem Durchschnittsalter erzielt. Dabei wurde besonders der hohe Defektanteil der Zellenverbinder um mehr als das 1.000-Fache verringert. Eine genaue Beschreibung der Anpassungsmaßnahmen findet sich entsprechend in [Hasselbrink *et al.* 2013]. Die Gegenüberstellung der aufgefundenen Abundanz der in Abbildung 5-6 aufgeführten Defektgruppen mit denen der angepassten Photovoltaikmodule führt sonach letztlich zur gleichen Erkenntnis, dass sich heutige kristalline Siliziumsolarmodule in der Widerstandsfähigkeit und der Defektanfälligkeit gegenüber älteren Pendants unterscheiden; wennschon in diesem Fall nur auf Herstellerebene.

Ein weiteres Indiz für die Stichhaltigkeit der aufgeworfenen Behauptung sind Expertenaussagen. Frau Franke von der Fachzeitschrift: „photovoltaik“ beispielshalber führt dazu auf, „[…] dass die ganze Hersteller-Technik [sic!] in den letzten Jahren eine steile Lernkurve hingelegt hat und ältere Module wahrscheinlich eher betroffen sind [betrifft die Defektanfälligkeit – Anm. d. Verf.] als neuere.“ [Franke 2015]

Andere Experten und Institutionen führen sodann neben der zeitlichen Ebene eine weitere Einflussgröße auf das Langzeitverhalten an: den Fertigungsort. [Battistutti 2013] beispielshalber schreibt asiatischen Photovoltaikmodulen aus dem sogenannten Low-Cost-Segment eine verkürzte Lebensdauer ob mangelnder Materialqualität, schlechter Verarbeitung, geringen Qualitätskontrollen während des Herstellungsprozesses oder ungeschulten Mitarbeitern et cetera zu. [Volkmann 2015] schreibt: „Betroffen [gemeint sind erhöhte Ausfallraten – Anm. d. Verf.] sind vorwiegend chinesische Module aus dem Low Cost Bereich, die weit vor der normalen Betriebszeit von 20 Jahren ausfallen.“ Zweifelsfrei können Faktoren wie Materialqualität oder die Unverträglichkeit bestimmter Materialien et cetera einen erheblichen Einfluss auf das Langzeitverhalten und die Defektanfälligkeit von kristallinen Siliziumsolarmodulen haben. Für den Nexus mit asiatischen Modulen fehlt jedoch die wissenschaftliche Fundierung, weshalb die Einflussgröße des Fertigungsortes auf die Ausfallraten kristalliner Siliziumsolarmodule, beziehungsweise die Generierung von $gSSM_{alt}$ im Sinne dieser Arbeit, keine Beachtung findet.

Es lässt sich folglich festhalten, dass sich neuere Modulkonzeptionen von älteren Modellen auch, oder im Sinne dieser Betrachtung, vor allem hinsichtlich Ausfallraten und Defektarten voneinander unterscheiden. Dies würde bei einer rein theoretischen Betrachtung in letzter Konsequenz dazu führen, dass sich aus einer fiktiven aber gleichen Installationsmenge beider Pendants ein Unterschied in der zeitlichen Verteilung der anfallenden Quantitäten und damit in der Ausprägung des für ein Recycling von kristallinen Siliziumsolarmodulen zur Verfügung stehenden Stoffstroms an $gSSM_{alt}$ ergäbe. Wenngleich die, nach den Angaben aus Abbildung 5-8, quasikontinuierliche Anpassung der Modulkonzeption und –produktion rein gedanklich eine Differenzierung der Defektraten in einem nahezu zweijährlichen Turnus zur Folge hätte, erscheint dies im Sinne der angestrebten annuellen Prognose der Abfallströme aus $gSSM_{alt}$ ob des geringen Unterschieds der daraus letztlich resultierenden Mengen als nicht zielführend. Dieserhalb erfolgt lediglich eine Zweiteilung aller prozentualen Angaben dieses Abschnittes für

Module, die bis beziehungsweise nach 2012 installiert wurden. Die Wahl des Zeitpunktes der Unterteilung liegt einerseits in der Marktentwicklung begründet. Nach drei Jahren Rekordzubau erfuhr der Markt der nationalen jährlichen Neuinstallationen im Jahr 2013 eine Reduktion um mehr als 55 % bezogen auf das Niveau von 2012 (vgl. Kapitel 4.2). [Wippich und Fiedler 2015] schreiben in diesem Zusammenhang besonders kristallinen Siliziumsolarmodulen „[…] in den starken Wachstumsjahren 2005 bis 2012“ erhöhte Ausfallraten zu. „Hier sind […] vor allem neue Materialien bzw. Materialmangel, neue Produktionsarten und die schnelle Skalierung der Produktion in Europa und Asien ein Grund.“ [Wippich und Fiedler 2015] Zudem attestiert [Sepanski *et al.* 2015] infolge des damaligen Stichtages der Vergütungsreduktion gemäß der EEG-Novelle von 2012 kristallinen Siliziumsolarmodulen, welche vor 2013 installiert wurden, eine größere Anzahl von Installationsmängeln als jenen der Folgejahre.

Andererseits orientiert sich der gewählte Zeitpunkt an den Ergebnissen der diskutierten Studie von [TÜV Rheinland 2014] in Verbindung mit der Marktentwicklung. Die erhebliche Reduktion der Durchfallquoten durch die Prüfsequenz nach IEC 61215 von 22 % im Jahr 2010 auf 10 % und weniger in den Folgejahren beeinflusst erst mit der Markteinführung und der tatsächlichen Installation der getesteten kristallinen Siliziumsolarmodule die daraus resultierenden Abfallströme. Zusammenfassend wird folglich kristallinen Siliziumsolarmodulen, welche nach 2012 installierten wurden, eine angepasste Qualität im Sinne der Defektanfälligkeit zugesprochen – einhergehend mit einem Unterschied in der zeitlichen Verteilung der anfallenden Abfallmenge und damit in der Ausprägung des für ein Recycling von kristallinen Siliziumsolarmodulen zur Verfügung stehenden Stoffstroms an $gSSM_{alt}$ verglichen zu früher installierten Modulkonzeptionen.

Neben jenen im Einführungskapitel separat aufgeführten Ergebnissen der initialen Literaturanalyse bestätigt die Korrespondenz mit Experten wie [Wippich und Fiedler 2015], [Franke 2015] und [Volkmann 2015] das bereits in den vorbezeichneten Ausführungen dieses Unterkapitels exponierte Defizit an adäquater Literatur, qualitativen Datenquellen, Erfahrungen und Expertenwissen; in toto einen erweiterten Forschungsbedarf zu verschiedensten Themenbereichen des Recyclings von kristallinen Siliziumsolarmodulen auch ob des noch jungen Forschungsfeldes und dem erst Mitte der 2000er gelungenem Durchbruchs der Solartechnologie auf dem terrestrischen Markt für erneuerbare Energien (vgl. Kapitel 4.2). Für die angestrebte Prognose des für ein

Recycling von kristallinen Siliziumsolarmodulen zur Verfügung stehenden Stoffstroms an $gSSM_{alt}$ werden neben der vorbezeichneten und begründeten Zweiteilung sämtlicher prozentualer Angaben etwaiger Defekt- und Ausfallraten deshalb die nachfolgenden, auf der Diskussion und den Angaben dieses Unterkapitels basierenden Annahmen zugrunde gelegt:

- Alle prozentualen Angaben, die als Schätzungen ausgewiesen sind, werden konservativ arbitriert. Ziel ist die Generierung einer unteren Schranke.
- Transport- und Installationsschäden, die einen Austausch der Module vor der Inbetriebnahme der Gesamtanlage effizieren, betreffen laut [Sander *et al.* 2004] und [Richter 2011] rund zwei Prozent der ursprünglichen Installationskapazität. Diese fallen gemäß der getroffenen Ausführungen vor der Inbetriebnahme der Photovoltaikanlage an, weshalb diesem prozentualen Wert der Zeitpunkt $t = 0$ zugeordnet wird – sprich der Zeitpunkt der Anlageninstallation. Zudem wird, der dargelegten Diskussion folgend, unterstellt, dass bereits bei dieser Defektart ein Unterschied der prozentualen Angaben in Abhängigkeit des Installationsjahres existiert. Sonach wird für kristalline Siliziumsolarmodule, welche bis einschließlich 2012 installiert wurden, der aufgeführte Wert von zwei Prozent veranschlagt; für Module, die nach 2012 installiert wurden und werden, ist dementsprechend ein geringerer Wert zugrunde zu legen. Für die Prognose der absoluten jährlichen Abfallströme aus den Installationen ab 2013 wird sonach ein konservativer defektspezifischer Wert von einem Prozent geschätzt.
- Innerhalb der ersten beiden Jahre nach der Anlageninstallation (Gruppe der Kinderkrankheiten) erfolgt neben der Unterteilung der Defektraten zwischen Anlagen, die vor beziehungsweise nach 2013 installiert wurden, zusätzlich eine Differenzierung des prozentualen Anteils der Jahresgesamtdefektrate für das erste und das zweite Jahr nach der Installation. Laut [Sepanski *et al.* 2015] tritt ein Defekt im ersten Betriebsjahr etwas weniger als doppelt so häufig auf. Dies bestätig auch [Wippich und Fiedler 2015]: „Mangelhaft produzierte Module (z.B. fehlerhafte Zellverbindungen, unzureichende Folien und mangelhafte Lamination [sic!]) führen oftmals frühzeitig zu einem schnellen Ausfall der Produkte.“ Für Module, die vor 2013 installiert wurden, geben [Sander *et al.* 2007] und [Beckmann 2010] jeweils eine Ausfallrate im ersten Betriebsjahr von 0,8 % an; [Sander *et al.* 2004] schätz diesbezüglich sogar einen Wert von einem Prozent. Die Differenz beider Werte ist wiederum die Folge des unterschiedlichen

zugrunde liegenden Anlagenalters. Es wird sonach für Anlagen, die vor 2013 installiert wurden, eine Ausfallrate von 0,8 % im ersten Betriebsjahr und 0,5 % im zweiten Betriebsjahr geschätzt. Für Anlagen, die nach 2013 installiert wurden und werden, soll der in [Köntges *et al.* 2014] in Verbindung mit [Richter 2011] aufgeführte Wert der kumulierten Defektrate von 0,5 % in den ersten beiden Betriebsjahren als Basis dienen. Dieser wird analog der dargelegten Logik wiederum in einen Defektwert von 0,3 % im ersten Betriebsjahr und von 0,2 % im zweiten Betriebsjahr aufgeteilt.

- Ähnlich verhält sich mit den Defektraten im Zeitraum von zwei bis zehn Jahren nach der Anlageninstallation. Auch hier ist laut [Sepanski *et al.* 2015] zusätzlich ein deutlicher Schnitt in den prozentualen Eintrittswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Defektarten zu beachten. Dieser setzt circa nach fünf Jahren Betriebszeit an. Der Studie folgend ist im Zeitraum von drei bis fünf Jahren ein geringfügig niedrigerer jährlicher Wert wie im zweiten Betriebsjahr anzunehmen. Dementsprechend wird für Module, die vor 2013 installiert wurden, eine jährliche Defektrate von knapp 0,4 % angesetzt. Für Installationen ab 2013 werden 0,15 % zugrunde gelegt. Nach fünf Jahren Betriebszeit zeigt sich für beide Fälle laut [Sander *et al.* 2004], [Köntges *et al.* 2014], [Sepanski *et al.* 2015] und [Wippich und Fiedler 2015] eine wesentlich geringere jährliche Defektwahrscheinlichkeit. Zum einen zeitigen Folgedefekte von Installations- und Transportschäden sowie von Defekten aus der Gruppe der Kinderkrankheiten zumeist bereits während der ersten fünf Betriebsjahre einen Modulaustausch, weshalb diese mit den vorangegangenen prozentualen Annahmen abgegolten sind. Zum anderen besitzen kristalline Siliziumsolarmodule keine Verschleißteile per Definition. Für den Zeitraum von fünf bis zehn Jahren nach der Inbetriebnahme ergibt sich die jährliche Defektrate aus okkasionell und imponderablen externen Effekten wie extreme Wetterverhältnisse, Vandalismus, falsche Wartung et cetera und dem Eintreten tatsächlicher altersbedingter Defekte. Diese Kombination soll für den betrachteten Zeitraum als gleichbleibend gering angenommen und als sogenanntes „Grundrauschen“ bezeichnet werden. Das Grundrauschen für Module, die vor 2013 installiert wurden, wird gemäß den Angaben der aufgeführten Literatur und Quellen auf einen jährlichen Wert von 0,08 % geschätzt; für Modulinstallationen ab dem Jahr 2013 auf 0,04 %. Wenngleich die getroffenen Annahmen auch ob der geringen Erfahrungswerte und verfügbaren Datenquellen

ein hohes Fehlerpotenzial in sich birgen, decken sie sich in Summe aber mit den Schätzungen der vorhandenen Literatur und Expertenmeinungen. Insgesamt ergibt sich sonach für die Gruppe der Module, welche vor dem Jahr 2013 installiert wurden, eine Gesamtausfallrate innerhalb der ersten zehn Jahre nach der Anlageninstallation von 2,1 % (exklusive Installations- und Transportschäden sowie der hohen Defektrate im ersten Betriebsjahr). Dies deckt sich mit Schätzungen von [Köntges *et al.* 2014] (circa zwei Prozent Ausfallrate in den ersten elf Betriebsjahren) und [Wippich und Fiedler 2015] (ebenfalls rund zwei Prozent innerhalb der ersten zehn Jahre nach Installation). Die Annahmen für Module, die ab dem Jahr 2013 installiert wurden und werden, zeigen ähnlich gute Übereinstimmungen mit der gängigen Literatur. [Wippich und Fiedler 2015] beispielshalber sprechen solchen Modulen eine Defektrate in den ersten zehn Jahren nach Installation von rund einem Prozent zu; die Summe der eigenen Annahmen ergibt exklusive der Installations- und Transportschäden sowie der hohen Defektrate im ersten Betriebsjahr 0,85 %.

- Für den offenen Zeitraum im Anschluss an die ersten zehn Jahre Betriebszeit wird vereinfachend weiterhin die Konstanz des definierten Grundrauschens angenommen. Dies begründet sich in den Ausführungen zur Abbildung 5-7 auf Seite 395f bezüglich der Studien von [Bombach *et al.* 2006] und [Köntges *et al.* 2014]. Ab dem 21. Betriebsjahr wird dem Grundrauschen zusätzlich eine Absterbekurve entsprechend des Erreichens der technischen Lebensdauer suppliert. Diese ist Gegenstand des subsekutiven Unterkapitels 5.2.1.3: „Altmodule am Ende der Nutzungsphase“, weshalb an dieser Stelle auf die dortige Diskussion verwiesen wird.
- Grundsätzlich sind für die anstehende Prognose des absoluten jährlichen Stoffstroms von $gSSM_{alt}$ an dieser Stelle nur die tatsächlichen Abfallmengen relevant. Die ausgewiesenen prozentualen Defektraten für den gesamten betrachteten Zeitraum ab der Anlageninstallation (t = 0) bis zum Erreichen der technischen Lebensdauer (t = n) beziehen sich für alle in einem Jahr installierten kristallinen Siliziumsolarmodule immer auf die absolut neu installierten Kapazitäten des zugrunde liegenden Jahres der Anlageninstallation. Der zusätzliche Beitrag zum Abfallstrom, der sich aus einem Defekt eines, für das initial installierte und ausgetauschte weil schadhafte Modul, neu installierten Ersatzmoduls ergeben würde, wird in den nachfolgenden Kapiteln thematisiert.

- Der Stoffstrom an $gSSM_{alt}$ fällt in Realität nicht konstant über ein Jahr verteilt an. Er unterliegt einer Überlagerung von saisonalen und tageszeitenabhängigen Schwankungen. Zum einen erhöht sich die Eintrittswahrscheinlichkeit einiger Defektarten strahlungsbedingt mit dem saisonalen solaren Energieangebot. Diese Abhängigkeit ist nach [Reil 2015] größer als der Einfluss von wetterbedingten Einflüssen wie Hagel und massiven Schneelasten, was laut [Sepanski *et al.* 2015] eine verstärkte Defektrate zwischen März und September nach sich zieht. Ein ähnlicher Zusammenhang zeigt sich im tageszeitlichen Strahlungsangebot. Zum anderen ist die Generierung von $gSSM_{alt}$ abhängig vom Zeitpunkt der Defektfeststellung. Das Konstatieren eines Defektes erfolgt zumeist, ausgenommen extreme Defektfolgen wie ein überbordender Leistungsverlust der Gesamtanlage oder eine akute Brandgefahr, infolge einer Wartung, Reinigung oder professionellem Überprüfung der Gesamtanlage. Solche Ereignisse konzentrieren sich ebenfalls auf die Monate zwischen März und September sowie auf Tageszeiten zwischen 8:00 und 18:00 Uhr, da sowohl die Reinigung als auch die Überprüfung mittels bildgebender Verfahren an die adäquate Präsenz von solarer Strahlung sowie die Absenz einer möglichen Schneebedeckung der Module geknüpft sind. Die Kombination aus saisonaler und tageszeitabhängiger Eintrittswahrscheinlichkeit spezifischer Defektarten sowie der Defektkonstatierung zeitigt nach [Sepanski *et al.* 2015] eine Konzentration von jeweils über 90 % innerhalb der benannten monatlichen und stündlichen Zeiträume. Im Sinne der jährlichen Prognose des für ein Recycling von kristallinen Siliziumsolarmodulen zur Verfügung stehenden Stoffstroms an $gSSM_{alt}$ werden diese Abhängigkeiten jedoch vernachlässigt. Für das Kapitel 5.6: „Optimierungsansätze der Beschaffungslogistik“ ist der Konnex zwischen saisonaler Defektwahrscheinlichkeit (Konstatierung und Eintrittswahrscheinlichkeit) wiederum von Bedeutung.
- Anders als die Produktionsausschüsse korreliert dieser Abfallstrom örtlich direkt mit der Installationsstätte, ergo mit dem regionalen Markt der jährlichen Neuinstallationen. Dies trifft sowohl für $gSSM_{alt}$ aus Transport- und Installationsschäden als auch für schadhafte und auszutauschende Module während der Nutzungsphase zu. Neben dem örtlichen Konnex besteht gleichwohl ein Zusammenhang in der Quantität des Abfallstroms und dem regionalen Markt der jährlichen Neuinstallationen.

Die nachstehende Tabelle 5-4 fasst nochmals alle vorgenannten prozentualen Annahmen zum Abfallaufkommen kurz vor und während der Nutzungsphase für kristalline Siliziumsolarmodule zusammen. Dabei kommt die getroffene Unterteilung der Schätzungen für Module, die vor beziehungsweise ab dem Jahr 2013 installiert wurden und werden, entsprechend zur Anwendung.

Tabelle 5-4: Zusammenfassung aller für das Abfallaufkommen kurz vor und während der Nutzungsphase eines kristallinen Siliziumsolarmoduls geschätzten prozentualen Eintrittswahrscheinlichkeiten der zeitraumspezifischen Defektarten, die einen Austausch betroffener Module zeitigen.

Geschätzte Defektraten		**Betriebszeit t in Jahren**							
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6 bis 10**	**Ab 11**
Zeitraum Installation	**Vor 2013**	2 %	0,8 %	0,5 %	0,4 %	0,4 %	0,4 %	0,08 %	0,08 %
	Ab 2013	1 %	0,3 %	0,2 %	0,15 %	0,15 %	0,15 %	0,04 %	0,04 %
	Anmerkungen	Transport + Installation	Kinderkrankheiten		Abgeltung „versteckter“ Defekte und Folgedefekte			Grundrauschen	

Wann aber erreichen kristalline Siliziumsolarmodule das Ende ihrer technischen Lebensdauer und wie ist diese definiert?

5.2.1.3 Altmodule am Ende der Nutzungsphase

Neben dem Abfallaufkommen kurz vor und während der Nutzungsphase eines $gSSM_{sc/mc}$ tragen vornehmlich Module mit dem Erreichen der technischen Lebensdauer zum betrachtungsrelevanten Abfallstrom bei. Als technische Lebensdauer ist beispielshalber nach [Ritter 2009, Seite 266] „die Lebenserwartung, in der ein […] Bauteil oder Material – unter Einbeziehung der notwendigen und üblichen Instandhaltungsmaßnahmen und unter Berücksichtigung der Abnutzung – seinen Funktionen und seinem bestimmungsgemäßen Gebrauch voll genügen kann“, definiert. Damit wird die technische Lebensdauer von der funktionellen und der wirtschaftlichen Lebensdauer klar abgegrenzt. Für die Photovoltaiktechnologie spezifiziert [Sander *et al.* 2004, Seite 29] den Begriff der technischen Lebensdauer als den „[…] Zeitraum zwischen ihrer Produktion und dem Zeitpunkt, an dem diese PV-Module aufhören, Strom zu produzieren, ohne dass sie durch menschliche Einflüsse (z.B. Demontage, Unfall oder Sachbeschädigung) zerstört oder vom Netz genommen werden.“ Dies gilt für die vorliegende Arbeit insofern, als dass solche externen Effekte wie Unfall, menschliche Einflüsse (beispielshalber Beschädigung durch unsachgemäße Wartung und Vandalismus) und extreme Wetterereignisse bereits mit dem im vorangegangenem Unterkapitel definierten Grundrauschen abgegolten sind. Da kristalline Siliziumsolarmodule für Normalanwendungen keine beweglichen und verschleißanfälligen Teile besitzen sowie für den regulären Betrieb keine Stoffströme bedürfen, gelten sie gemeinhin als höchlich langlebig und robust. Was aber determiniert nun die technische Lebensdauer kristalliner Siliziumsolarmodule und welchen Umfang weißt diese auf? Die entscheidenden Einflussgrößen sind letztlich der alterungsbedingte Wirkungsgradverlust (Degradation) und altersbedingte Defekte infolge von wiederkehrenden thermischen und mechanischen Beanspruchungen, Verwitterung und Versprödung der Materialien sowie Langzeiteffekte. Ein in der Literatur und in Prognosemodellen für ein Aufkommen an Altmodulen häufig anzutreffendes Modell zur Determinierung der technischen Lebensdauer kristalliner Siliziumsolarmodule orientiert sich alleinig am Degradationsverhalten oder an der Leistungsgarantie der Hersteller von 25 oder 30 Jahren ([Philipp 2014], [Fthenakis und Kim 2011], [Cucchiella *et al.* 2015], [Binder 2013] und [Fischer *et al.* 2012]). Letztendlich haben beide Annahmen die gleiche Basis, da die herstellerseitige Leistungsgarantie, wie im vorangegangenen Unterkapitel aufgezeigt, zumeist eine maximale Senkung auf 80 % der Ausgangsleistung über einen Zeitraum von 25 Jahren zusichert.

Dies würde in der Konsequenz bedeuten, dass kristalline Siliziumsolarmodule allesamt schlagartig nach 25 Jahren Betrieb ihre technische Lebensdauer erreichen und infolgedessen Altmodule mit jener Verzögerung nach deren Inbetriebnahme in Form eines Dirac-Impulses anfallen. Dementgegen zeigen Untersuchungen wie beispielshalber [Seltmann 2015], dass selbst 1976 produzierte Solarmodule entsprechender Qualität über 40 Jahre hinweg zuverlässig betrieben werden können. Zudem wurde bei den untersuchten Modulen lediglich ein Gesamtleistungsverlust von rund vier Prozent über 35 Betriebsjahre festgestellt. Wenngleich bis jetzt keine präzise und universelle Obergrenze für die technische Lebensdauer kristalliner Siliziumsolarmodule bekannt beziehungsweise wissenschaftlich belegt ist, kann in Verbindung mit den bereits diskutierten Studien um [Köntges et al. 2014] und [Bombach et al. 2006] zu Langzeitdefekten selbst bei einer realitätsfernen Vereinfachung des Sachverhaltes nicht von einem stoßartigem Anfall jeglicher Module nach 20, 25 oder 30 Jahren ausgegangen werden. Vielmehr ist vereinfachend anzunehmen, dass das Erreichen der technischen Lebensdauer einer Verteilungsfunktion folgt. Das gängige Mittel zur Beschreibung der technischen Lebensdauer stellt die Weibullverteilung dar ([Ritter 2011], [Dickhaus 2015] und [Viga 2008]). Die Weibullverteilung ist eine asymptotisch zulaufende Extremwertverteilung mit zwei Parametern. Die Verteilungsfunktion besitzt folgende Form

$$F(t_v) = 1 - e^{-\left(\frac{t_v}{T_L}\right)^b} \qquad \textbf{Formel 5-1}$$

mit T_L als sogenannten Lageparameter, b als Formparameter und t_v als Lebensdauer in Jahren. Der Lageparameter T_L entspricht der charakteristischen Lebensdauer, welche dem Zeitpunkt t_v gleichzusetzen ist, an dem 63,2 % aller Module die Abfalleigenschaft zugesprochen bekommen. Der Formparameter b ist ein Streuungsmaß und dient der Modellierung der Verteilungsfunktion. Wird für b ein Wert kleiner eins gewählt, fallen frühzeitig viele Altmodule an; wird ein Wert größer als eins gewählt, ist von einem „verspäteten“ Anfall von Altmodulen auszugehen. Besitzt der Formparameter genau den Wert eins, entspricht die Verteilungsfunktion einer Exponentialfunktion. Wird für b der Wert 3,5 gewählt, ähnelt der Verlauf näherungsweise der Gauß'schen Normalverteilung. Die Variable t_v (Index v steht für: verschoben) wird im vorliegenden Falle als Lebensdauer ab dem 21. Lebensjahr, mit dem im vorangegangenem Unterkapitel festgelegtem Ansetzen der Absterbekurve, verstanden, wobei die Absterbekurve die Übersetzung der Ergebnisse der Weibullverteilungsfunktion für kristalline Siliziumsolarmodule darstellt.

Wenngleich analog der Logik zur Unterteilung der Abfallraten aus Altmodulen kurz vor und während deren Nutzungsphase nach den Installationszeiträumen vor dem Jahr 2013 und ab dem Jahr 2013 auch der Lage- und der Formparameter der Weibullverteilungen für beide Zeiträume variieren müssten, ist der Ansatz der jeweiligen, vom Installationszeitraum abhängigen Absterbekurven indessen für beide Fälle ingleichen ab dem 21. Betriebsjahr supponiert. Einen wesentlichen Grund dafür stellt die bislang usuelle herstellerseitige Limitierung der Leistungsgarantie auf 25 Jahre dar. Da diese standortunabhängig Geltung besitzt, sind kristalline Siliziumsolarmodule für den weltweiten Betrieb unter widrigsten Bedingungen konzipiert. Die klimatischen Bedingungen und die Häufigkeit extremer Wetterverhältnisse in Deutschland stellen sich für die Widerstandsfähigkeit installierter Module jedoch als vergleichsweise gemäßigt bis harmlos dar, sodass während der ersten 25 Betriebsjahre kristalliner Siliziumsolarmodule neben den bereits beschriebenen und definierten Defektraten konstruktionsbedingt nicht von einem über das Grundrauschen hinausgehende Aufkommen an Altmodulen zu rechnen ist. Abgesehen vom tatsächlichen Erreichen der technischen Lebensdauer können indessen funktionsfähige Solarmodule auch aufgrund von Repoweringmaßnahmen die Abfalleigenschaft zugesprochen bekommen. Dies ist jedoch zumeist an wirtschaftliche Überlegungen geknüpft. [Sander *et al.* 2004, Seite 32] konstituiert diesbezüglich, dass keine wirtschaftlichen Gründe zum vorzeitigen Modulaustausch hinsichtlich Repoweringmaßnahmen existieren, „[…] da der Betrieb von PV-Modulen nicht gewinnbringend erfolgt und die Einnahmen aus Einspeiseerlösen (Grenzerträge) nach der Inbetriebnahme auch bei nachlassender Leistung größer sind als die mit dem Weiterbetrieb verbundenen Aufwendungen (Grenzkosten).“ Da diese Sichtweise nicht vollends in allen Situationen zutreffend ist, werden Repoweringmaßnahmen als Quelle für Altmodule in der angestrebten Abfallprognose mit einkalkuliert. Diesbezüglich wird unterstellt, dass der Anlagenersatz durch neue und möglicherweise leistungsfähigere Komponenten erst im fortgeschrittenen Anlagenalter einsetzt weil nicht von der Leistungsgarantie mit abgedeckt und sonach mit Investitionen einhergehend. In Verbindung mit der oben aufgeführten Behauptung von [Sander *et al.* 2004] wird dieserhalb supponiert, dass sich die ersten Repoweringmaßnahmen auf Modulebene mit dem 21. Betriebsjahr zutragen – jedoch in verhaltenem Maße. Eine weitere Stütze dieser Annahme ist zudem, dass das Groß der kristallinen Siliziumsolaranlagen nach 2009 installiert wurde und sonach insgesamt ein hohes technisches Niveau aufweist. Wie im Kapitel 3.3.5: „Betrachtungen zum Wirkungsgrad kristalliner Siliziumsolarzellen“ bereits dargestellt,

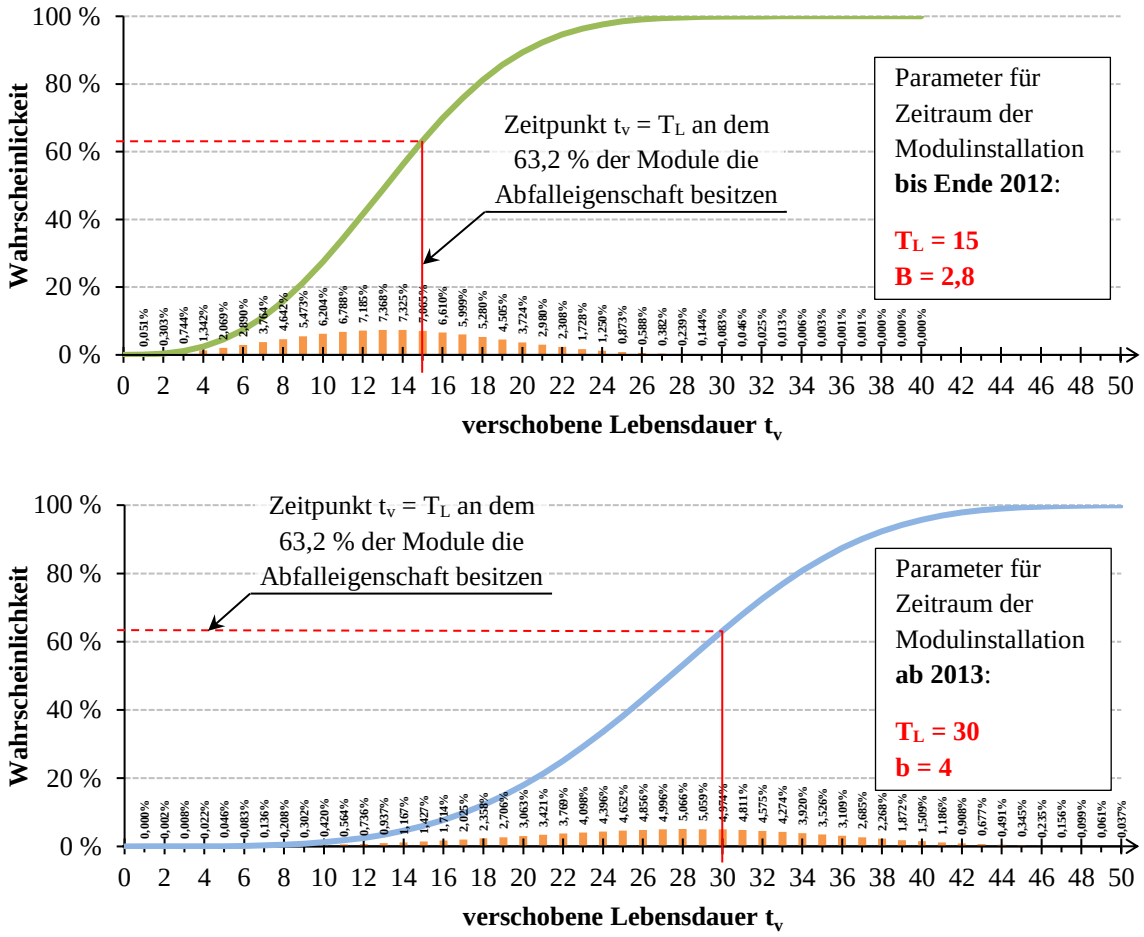
befinden sich aktuelle Zellenkonzepte der kristallinen Siliziumsolartechnologie für Nichtkonzentratorsysteme nahe der theoretischen Wirkungsgradgrenze von 29 %. Dies verhindert zusätzlich ein frühzeitiges Ansetzen eines etwaigen leistungsbezogenen Modulaustauschs aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen einer nach 2009 installierten Anlage. Es ist daher vielmehr von einem Repowering am tatsächlichen Lebensende einer bestehenden kristallinen Siliziumsolaranlage auszugehen. Ab dem 26. Betriebsjahr, mit Auslaufen der herstellerseitigen Leistungsgarantie, ist für die Prognose des Abfallstroms irrelevant, ob Altmodule infolge von Repoweringmaßnahmen oder aufgrund des Erreichens der technischen Lebensdauer anfallen; alleinig der Tatbestand der Zuschreibung der Abfalleigenschaft ist von Bedeutung.[134] Neben Modulen, die die technische Lebensdauer erreicht haben oder aufgrund von Repowering ersetzt wurden, beinhaltet die Absterbekurve auch Altmodule insolventer Hersteller, die eine über die Leistungsgarantie eminent hinausgehende Degradation aufweisen.

Um der bisherigen Logik zur Unterscheidung der Abfallraten in Abhängigkeit der Installationsära (vor dem Jahr 2013 und ab dem Jahr 2013) nachzukommen, werden zur Beschreibung der Absterbekurve beider Zeiträume auch zwei verschiedene Weibullverteilungen zugrunde gelegt. Dies erfolgt durch Variation der jeweiligen Lage- und Formparameter, welche zusammen mit den aus Formel 5-1 jeweils resultierenden Verteilungsfunktionen sowie den sich daraus ergebenden jährlichen Absterbewahrscheinlichkeiten in der Abbildung 5-9 auf nachfolgenden Seite aufgeführt sind. Bei den beiden getrennt dargestellten Verteilungsfunktionen handelt es sich um die Absterbekurven der spezifischen Installationszeiträume bis und ab 2013, verschoben um die gemeinsame Variable der Verteilungsfunktion t_v. Die abgebildeten Werte von t_v setzten sich sonach aus der tatsächlichen Lebensdauer plus 20 Jahre zusammen, sodass beispielshalber die Angabe $t_v = 5$ folglich eine reale Betriebszeit von 25 Jahren darstellt. Zusätzlich verstehen sich alle Angaben der nachstehenden Abbildung 5-9 exklusive jedweder weiterer Effekte wie die bereits beschriebenen Defektraten.[135]

---

[134] Für funktionstüchtige Module, die durch neue und möglicherweise leistungsfähigere Pendants ab dem 21. Lebensjahr ausgetauscht werden, ergibt sich neben dem Beitrag zum für ein Recycling von kristallinen Siliziumsolarmodulen zur Verfügung stehenden Stoffstromes auch ein Zweitmarkt. Dieser ist Gegenstand des Kapitels 5.4.4.2: „Zweitmarkt“ ab Seite 557. Wenngleich dies die Quantität des verfügbaren Abfallstroms zum Recycling beeinflusst, wird dieser nur um den Anteil funktionsfähiger Module, welche zudem eine adäquate restliche Nennleistung aufweisen, geschmälert. Der bisherigen Diskussion folgend ist dieser Anteil jedoch als gering einzustufen. Eine gewichtigere Auswirkung von Repowering im Zusammenhang mit der Prognose von Abfallströmen ergibt sich durch den Beitrag zur zugrunde liegenden jährlichen Installationsrate. Dieser Effekt ist Gegenstand des Unterkapitels 5.2.2.2 ab Seite 416.

[135] Die Bereinigung der Werte und die Korrektur auf die tatsächliche Basis ist nicht Ziel dieses Kapitels. Hierfür wird auf das subsekutive Kapitel 5.2.2 verwiesen.



Legende:

(Kurve) → Absterbekurve für Module die bis Ende 2012 installiert wurden
(Kurve) → Absterbekurve für Module die ab dem Jahr 2013 installiert wurden und werden
(Säulen) → jeweils resultierende jährliche Absterbewahrscheinlichkeit

Abbildung 5-9: Absterbekurven (Weibullverteilungen) nach Formel 5-1 für kristalline Siliziumsolarmodule unterteilt in die Installationszeiträume bis Ende 2012 und ab 2013 inklusive der zugrunde liegenden Form- und Lageparameter sowie der sich jeweils ergebenden annuellen Absterbewahrscheinlichkeiten.

Infolge der um 20 Jahre verschobenen Zeitachse erhöht sich entsprechend auch der zum Parameter T_L zugehörige reale Wert um 20 Jahre. Werden die etwaigen Defektraten während der Nutzungsphase, welche im vorstehendem Unterkapitel beschrieben wurden, aus der Betrachtung exkludiert, ergibt sich aus der Betrachtung der zugehörigen und um t_v verschobenen Weibullverteilung für die Gruppe der Module, die bis Ende 2012 installiert wurden, dass 63,2 % der kristallinen Siliziumsolarmodule mit Erreichen des 35 Lebensjahres (Wert des Lageparameters plus t_v) die Abfalleigenschaft zugesprochen bekämen. Zum einen deckt sich dies mit der Annahme von [Sander *et al.* 2004], der die Lebenserwartung von Photovoltaikmodulen auf mindestens 30 bis 35 schätzt. Zum anderen wird dies der bereits aufgeführten Untersuchung von [Seltmann 2015] gerecht, die den Einzelanlagen mitunter eine reale Lebensdauer von mehr als 40 Jahren zuspricht.

Für die Gruppe der Module, die ab dem Jahr 2013 installiert wurden und werden, resultiert ob der Wahl des Parameters T_L in Höhe von 30 Jahren, dass 63,2 % der kristallinen Siliziumsolarmodule mit Erreichen des 50. Lebensjahres (Wert des Lageparameters plus t_v) die Abfalleigenschaft zugesprochen bekämen. Gleichwohl ist dieser vom Installationszeitraum abhängigen Modulgruppe ebenfalls ein höherer Wert für das Streuungsmaß *b* der Verteilungsfunktion zugesprochen als der Gruppe der Module, die bis einschließlich 2012 installiert wurden. Grundlage der angenommenen Varianz jenes Parameters für beide Verteilungsfunktionen ist einerseits der im Kapitel 4.7: „Übersicht Produzenten“ beschriebene Trend, dass mit der Verlagerung der Produktionskapazitäten in andere Staaten und dem damit einhergehenden Anstieg an Importmodulen eine höhere Streuung der installierten Modulqualitäten unterstellt wird, was ein höheres Spektrum an zu erwartenden Lebensdauern bedeutet. Andererseits stärkt eine erhöhte Lebensdauer den Einfluss weiterer Effekte, die einen Austausch von bestehenden Photovoltaikanlagen nach sich ziehen. Dies betrifft sowohl Repoweringmaßnahmen infolge eines zukünftig möglichen Marktumbruchs (ob etwaiger Fortschritte in den Wirkungsgraden, den jeweils zugrunde liegenden technologiespezifischen Produktionsprozessen zusammen mit einer potenziellen Kostenreduktion) zugunsten anderer Photovoltaiktechnologien als auch die Abhängigkeit der Nutzungsdauer einer kristallinen Siliziumsolaranlage von beispielshalber der Lebensdauer der Grundsubstanz des Installationsortes (Dächer, Fassaden et cetera). Diese Abhängigkeit nimmt mit steigender Lebenserwartung der installierten Photovoltaikanlage zu und wirkt sich folglich auf die Streuung der Verteilungsfunktion aus.

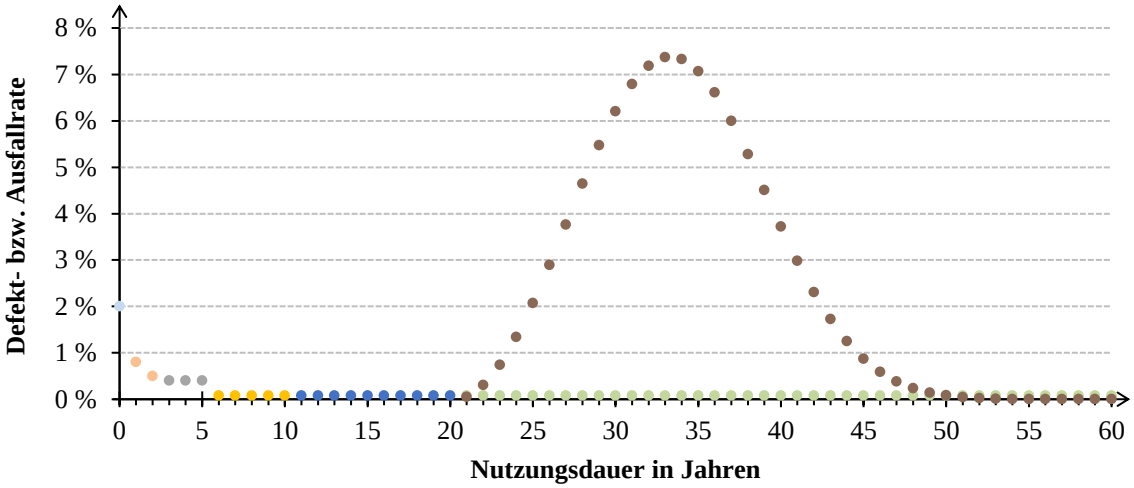
5.2.2 Prognose der jährlichen Altmodulströme

Die auf den theoretischen Grundlagen und den darin begründeten Annahmen aufbauende Beschreibung der tatsächlichen Abfallströme aus der kristallinen Siliziumsolartechnologie sowie der Prognose zukünftiger annueller Quantitäten ist im Sinne eines Zugewinns an Erkenntnissen in eine rein prozentuale und eine absolute Betrachtung zu unterteilen.

5.2.2.1 Prozentuale Betrachtungen

Wie zuvor diskutiert, zeitigen die getrennt beschriebenen Lebensabschnitte eines kristallinen Siliziumsolarmoduls (von der Produktion kristalliner Siliziumsolarmodule bis hin zum Erreichen der technischen Lebensdauer) abweichende Beiträge zum verfügbaren Abfallstrom an $gSSM_{alt}$. Gleichwohl wirken sich diese etwaigen Ausschuss-, Defekt- beziehungsweise Absterberaten unterschiedlich auf die zugrunde liegende Basis installierter Solarmodule aus, wodurch die einzelnen Beiträge ungleich beeinflusst werden; sie sind folglich mathematisch zu korrigieren. Ziel ist eine korrigierte Beschreibung der jährlichen prozentualen Beiträge zum betrachtungsrelevanten Abfallstrom über den gesamten Lebenszyklus sowie die Ableitung einer ganzheitlichen Absterbekurve von der Inbetriebnahme bis zum Erreichen der technischen Lebensdauer.

Nachstehende Abbildung 5-10 fasst diesbezüglich alle zum betrachtungsrelevanten Abfallstrom beitragenden jährlichen Raten ab der Anlageninstallation zusammen. Dies geschieht exemplarisch für die Gruppe der Module, welche bis Ende 2012 installiert wurden, wenngleich die Unterteilung in die beiden Installationszeiträume vor und ab dem Jahr 2013 beibehalten wird. Die Abbildung stellt dabei die zeitraumabhängigen Defektraten der diversen Lebensabschnitte, wie in Tabelle 5-4 auf Seite 405 vorgenommen, differenziert dar. Datengrundlage der annuellen Defekt- beziehungsweise Ausfallraten bilden die angegeben Werte der Tabelle 5-4 sowie die in der Abbildung 5-9 auf Seite 410 einzeln aufgeführten jährlichen Absterbewahrscheinlichkeiten (in besagter Abbildung durch orangene Säulen gekennzeichnet). Produktionsausschüsse und –abfälle sind indessen aus der Übersicht exkludiert, weil sie sich auf die Produktionsmengen beziehen und sonach eine andere Bezugsbasis als die annuellen Neuinstallationen innehaben.



Legende und Wertetabelle:

Transport- und Installationsschäden		→	2 %	Quelle:
Kinderkrankheiten		→	0,8 % / 0,5 %	
3. bis 5. Betriebsjahr		→	jeweils 0,4 %	Tabelle 5-4
6. bis 10. Betriebsjahr	„Grundrauschen“	→	jeweils 0,08 %	
11. bis 20. Betriebsjahr				
Ab dem 21. Betriebsjahr				
Jährliche Absterbewahrscheinlichkeiten der Weibullverteilung		→	variabel	→ Abbildung 5-9

Abbildung 5-10: Jährliche Defekt- beziehungsweise Ausfallraten kristalliner Siliziumsolarmodule nach den einzelnen Lebensabschnitten beginnend mit dem Transport und der Anlageninstallation bis hin zum Erreichen des technischen Lebensendes für Module, die bis Ende 2012 installiert wurden.

Die Abbildung ist folglich eine zusammenfassende aber überlagerte Darstellung aller diskutierten Ursachen zur Zuschreibung der Abfalleigenschaft. Da die Weibullverteilung das Erreichen der technischen Lebensdauer der Module definiert, stellt diese auch das Abschlusskriterium des betrachteten Zeitraums dar. Erreicht die Weibullverteilung 100 %, ist dies gleichbedeutend damit, dass allen Modulen, auf deren Installationszeitpunkt sich die Verteilungsfunktion bezieht, die Abfalleigenschaft obliegt. Für die Gruppe der Module, die ab 2013 installiert wurden und werden, ergibt sich ein ähnliches Bild, wennschon auf Grundlage der zeitraumspezifischen Defekt- und Ausfallraten in gestreckter Form. Allerdings zeitigt diese Darstellung zwei Probleme. Einerseits kann die jeweilige Weibullverteilung nicht auf die gesamten Neuinstallationen des zugrunde liegenden Installationsjahres bezogen werden, da diese erst nach 20 Jahren Nutzungsdauer ansetzt. Es muss folglich eine um die in den ersten 20 Betriebsjahren bereits ausgeschiedenen Module korrigierte Bezugsbasis zugrunde gelegt werden. Zum anderen überlagern sich während des Zeitraums, der mittels der Weibullverteilung beschrieben wird, die Verringerung der Bezugsbasis der installierten Module durch das Einwirken der Weibullverteilung mit der steten Verringerung der Grundgesamtheit durch das definierte

Grundrauschen. Infolge der Überlagerung muss die Grundgesamtheit der Module, die ihr technisches Lebensende erreichen können, ohne dass sie infolge des Grundrauschens ausscheiden, um die jährliche Minderung aufgrund des Grundrauschens kontinuierlich annuell korrigiert werden. Die Korrektur der in Abbildung 5-10 dargestellten Raten erfolgt sonach durch eine mathematische und vom Betriebsjahr abhängigen variablen Anpassung der Grundgesamtheit für die Weibullverteilung sowie einer Korrektur der für die Weibullverteilung tatsächlich zur Verfügung stehenden Menge an installierten Modulen eines Bezugsjahres. Alle anderen prozentualen Angaben, wie beispielshalber die Kinderkrankheiten oder das definierte Grundrauschen, stellen keine von der Grundgesamtheit abhängigen Werte dar; sie sind prozentuale Quasikonstanten.

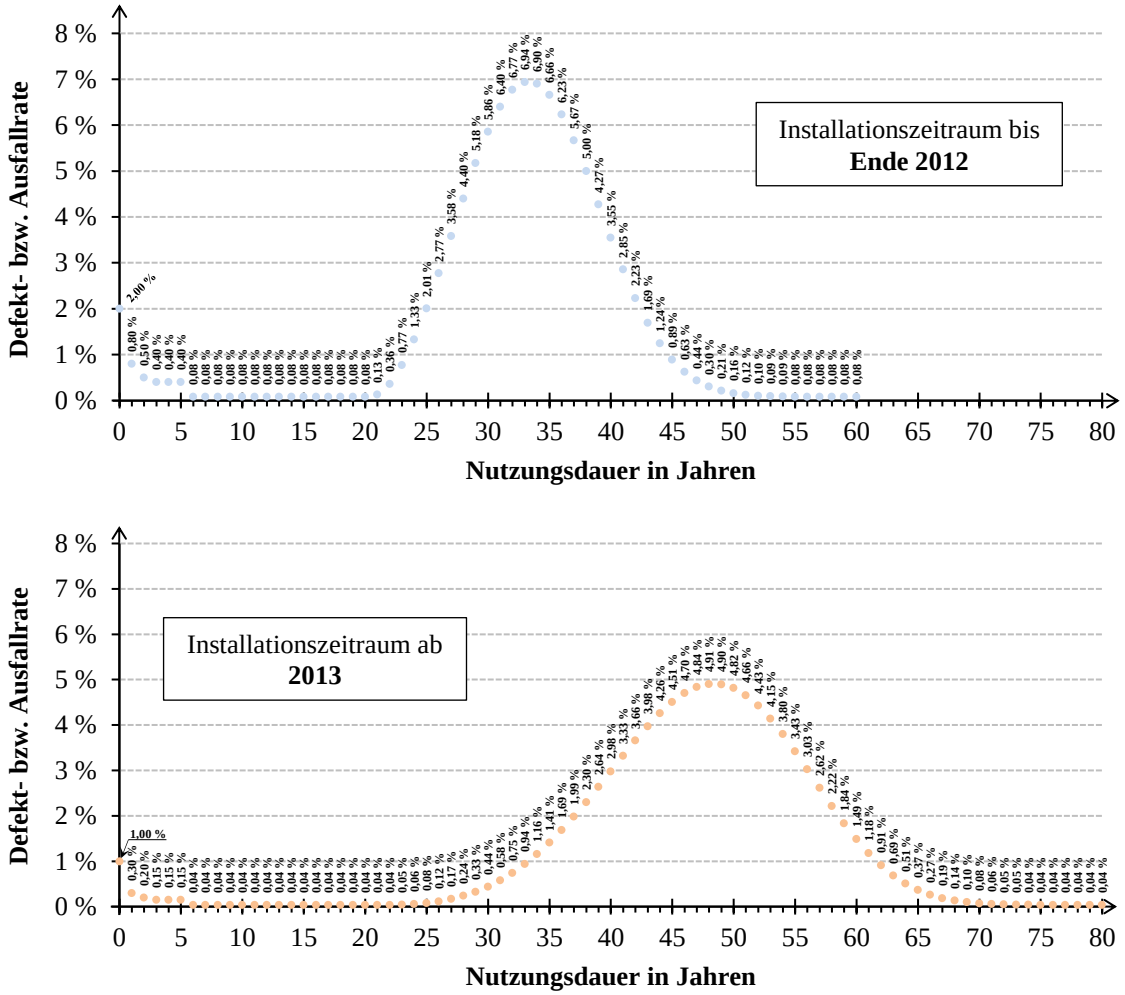
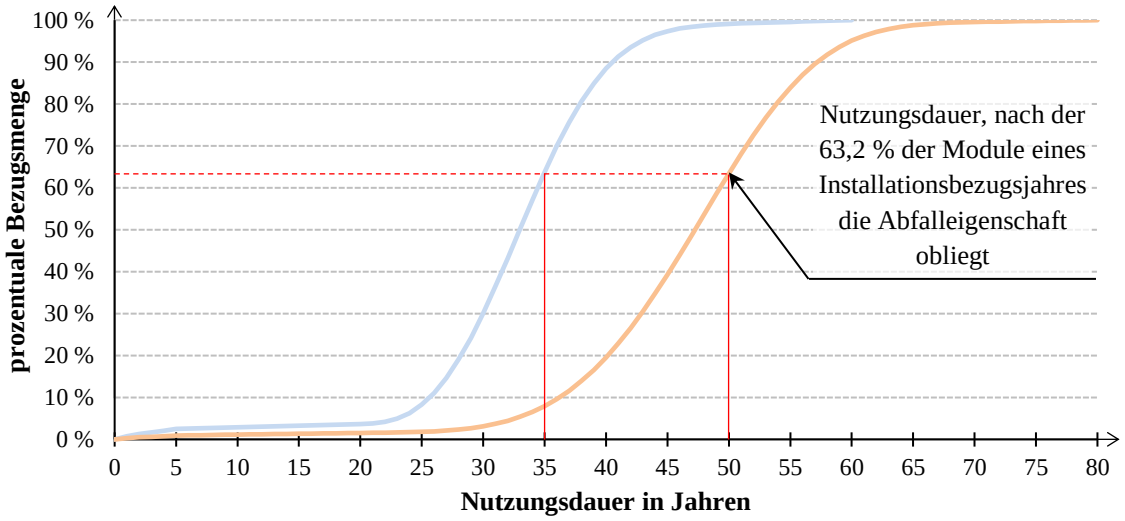


Abbildung 5-11: Korrigierte jährliche Abfallraten kristalliner Siliziumsolarmodule über die gesamte Nutzungsdauer (inklusive Transport- und Installationsschäden) getrennt für installierte Module bis Ende 2012 und ab 2013.

Abbildung 5-11 zeigt die sich ergebenden jährlichen Abfallraten für beide Installationszeiträume getrennt, wobei zusammenfassend sowohl die korrigierten Werte der zugrunde liegenden Weibullverteilungen als auch die konstanten Prozentangaben numerisch aufgeführt werden. Gleichwohl wird die Dualität des Wirkens des Grundrauschens und der Weibullverteilungen aufgehoben, indem das Grundrauschen in die jährlichen Raten der Weibullverteilung integriert ist. Sonach wird für jedes Jahr eine spezifische Wahrscheinlichkeit der Zuschreibung der Abfalleigenschaft definiert. Dies ist gleichbedeutend mit der gesuchten korrigierten Beschreibung der jährlichen prozentualen Beiträge zum betrachtungsrelevanten Abfallstrom über den gesamten Lebenszyklus, wobei die Produktionsausschüsse der Tabelle 5-3 auf Seite 377 für das betreffende Installationsjahr noch hinzuzurechnen sind.

Die Summe der annuellen Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Verläufe der Abbildung 5-11 ergeben unter Ausschluss der Transport- und Installationsschäden jeweils 100 %. Transport- und Installationsschäden müssen aus der Summenbildung ausgeschlossen werden, da sie die Grundgesamtheit der installierten Module zum Bezugszeitpunkt nicht beeinflussen. Eine kumulierte Darstellung der annuellen Wahrscheinlichkeiten führt letztlich zur angestrebten ganzheitlichen Absterbekurve von der Inbetriebnahme bis zum Erreichen der technischen Lebensdauer für beide vom Installationszeitraum abhängigen Modulgruppen (Module die bis Ende 2012 installiert wurden, sowie Module die ab 2013 installiert wurden und werden). Diese sind in Abbildung 5-12 auf der nachfolgenden Seite für beide Gruppen zusammen dargestellt. Mithilfe einiger wichtiger Signalpunkte der beiden Kurvenverläufe lässt sich zudem die Stringenz der auf den bisherigen Annahmen basierenden Ergebnisse überprüfen. So zeigt der Vergleich der korrigierten ganzheitlichen Absterbekurve mit den Daten der zugrunde liegenden Weibullverteilung eine um die Variable t_v verschobenen Übereinstimmung hinsichtlich des Erreichens der 100 %-Marke sowie der Nutzungsdauer, an der 63,2 % der Module eines Bezugsjahres die Abfalleigenschaft obliegt[136]. Zudem entspricht die größere Steigung beider Kurven in den ersten fünf Betriebsjahren den erhöhten Defektraten wie im Kapitel 5.2.1.2 beschrieben. Letztlich weisen beide in Abbildung 5-12 dargestellten Kurven einen streng monotonen Anstieg auf.

[136] Es ist zu beachten, dass beide Punkte der korrigierten ganzheitlichen Absterbekurve der jeweiligen Weibullverteilung dem spezifischen Lageparameter T_L plus der Variable t_v entsprechen.



Legende:

→ ganzheitliche und korrigierte Absterbekurve für Module die bis Ende 2012 installiert wurden
→ ganzheitliche und korrigierte Absterbekurve für Module die ab dem Jahr 2013 installiert wurden und werden

Abbildung 5-12: Korrigierte Absterbekurven über die gesamte Nutzungsdauer kristalliner Siliziumsolarmodule beginnend mit dem Transport der Module und der Anlageninstallation bis zum Erreichen des technischen Lebensendes für Installationen bis Ende 2012 und ab 2013.

5.2.2.2 Absolute Betrachtungen

Grundlage der Prognose annueller absoluter Abfallströme kristalliner Siliziumsolarmodule sind die korrigierten jährlichen Abfallraten der Abbildung 5-11, welche mit den technologiebereinigten historischen, gegenwärtigen und zukünftigen jährlichen Neuinstallationen kombiniert werden. Weiter sind die Produktionsausschüsse und -abfälle dem betreffenden Jahr zuzuordnen sowie etwaige Wechselwirkungen und Beeinflussungen der Datenbasis zu beachten.

Nachstehende Tabelle 5-5 auf der folgenden Seite fasst alle Datenquellen nochmals zusammen und ordnet entsprechend den spezifischen Bezugspunkt nach Kapiteln zu. Gleichwohl ist der Tabelle der Fortgang der sich anschließenden Diskussion zu entnehmen. Es bleibt anzumerken, dass die Prognose absoluter annueller Altmodulströme entgegen den bisherigen Eingrenzungen zuerst für Gesamtdeutschland erfolgt, bevor eine Betrachtung in den Grenzen des ostdeutschen Produktionsclusters fokussiert wird.

Tabelle 5-5: Datenbasis mit Bezugspunkt und Fortgang für die Diskussion der absoluten Abfallprognose.

		Art	Quelle	Anmerkungen	Erläuterung
Datenbasis	**korrigierte jährliche Abfallraten**	Prozentuale Werte	Kapitel 5.2.2.1 / Abbildung 5-11	Getrennt für Installationen vor 2013 und ab 2013	A
	Technologiebereinigte historische Neuinstallationen	Absolute Werte	Kapitel 4.4 / Abbildung 4-18	Zuzüglich der Werte für 2014 und 2015	B
	Zukünftige Neuinstallationen	Diskussion	Kapitel 4.2.3	Verknüpfung führt zu technologiebereinigten zukünftigen Neuinstallationen	C
		Technologie-anteile	Kapitel 4.3		
	Produktionsmengen	Absolute Werte	Kapitel 4.7 / Tabelle 4-32 i.V.m Tabelle 4-33	Beschränkt auf Produktionsmengen von Modulen im Jahr 2013	D

Die Erläuterungen zur Tabelle 5-5 dienen der Zuordnung der jeweiligen Datenbasis zur Prognose der absoluten Abfallströme sowie der Betrachtung etwaiger Besonderheiten, Wechselwirkungen und Konsequenzen für das Ergebnis ob deren Implementation.

- Erläuterung A: Nach Abbildung 5-11 auf Seite 414 wird beiden Modulgruppen (Installationszeiträume bis Ende 2012 und ab 2013) eine spezifische Defektrate je Betriebsjahr prädiziert. Diese Zeitreihen beschreiben die Auswirkungen im Sinne eines Anfalls an Altmodulen bezogen auf das betrachtete Installationsjahr. Dabei werden Transport- und Installationsschäden dem Bezugsjahr direkt als Altmodule zugerechnet (es gilt $t_i = 0$, wobei i das Bezugsjahr definiert und die Höhe des Wertes die Differenz zwischen Installationszeitpunkt und Betriebsjahr darstellt). Wird beispielshalber das Installationsjahr 2008 zugrunde gelegt, ist sonach davon auszugehen, dass 0,5 % der im Jahr 2008 installierten Module im zweiten Betriebsjahr ($t_{2008} = 2 \rightarrow 2010$) anfallen; circa 1,33 % im 24. Betriebsjahr ($t_{2008} = 24 \rightarrow 2032$) und rund 6,9 % im 34. Jahr nach der Inbetriebnahme ($t_{2008} = 34 \rightarrow 2042$). Die Installationsmenge eines Bezugsjahres wirkt sich ergo unterschiedlich auf die Mengen von Altmodulen in den 60 Jahren nach deren Installation aus (im Falle von Modulen, die nach 2013 installiert wurden und werden beträgt die Folgewirkung 80 Jahre). Es wird somit jedem Installationsjahr eine vom Installationszeitraum abhängige Absterbekurve zugeordnet. Als Folge daraus ergibt sich eine Überlagerung der spezifischen Jahresauswirkungen der Einzelbeiträge der Bezugsjahre (Installationsjahre). Dies führt letztlich zu dem Ergebnis, dass sich ein Abfallstrom eines Jahres aus den Einzelbeiträgen der vorangegangenen Installationsjahre für die jeweiligen Werte von t_i, worin

sich Bezugsjahr und Betriebsjahr gleichen, und dem Eigenbeitrag für $t_i = 0$ zusammensetzt. Für das Jahr 2012 ergibt sich demnach beispielshalber ein Eigenbeitrag von 2 % der Installationen aus diesem Bezugsjahr (Transport- und Installationsschäden / $t_{2012} = 0$) zuzüglich 0,8 % Beitrag aus den Defektraten der Installationen des Jahres 2011 ($t_{2011} = 1$); 0,5 % aus den Installationen von 2010 ($t_{2010} = 2$); 0,4 % der Installationen von 2009 ($t_{2009} = 3$) bis 0,08 % für $t_{2012\text{-}60} = 60$. Zum Gesamtabfallstrom eines Jahres kommen noch die jeweiligen Produktionsausschüsse hinzu. Diese sind Gegenstand der Erläuterung D.

- Erläuterung B: Die prozentualen Einzelbeiträge aus der vorangegangenen Erläuterung beziehungsweise aus Abbildung 5-11 auf Seite 414 sind immer mit den absoluten technologiespezifischen Installationen des Bezugsjahres i zuzüglich sogenannter Schatteninstallationen[137] zu multiplizieren. Wie bereits angedeutet, sind ob der Eingrenzung der Betrachtung auf die kristalline Siliziumsolartechnologie nicht die jährlichen Gesamtneuinstallationen als Datenbasis zugrunde zu legen, sondern die technologiebereinigten Neuinstallationen. Diese können für die historischen Neuinstallationen der Abbildung 4-18 im Kapitel 4.4 auf Seite 204 entnommen werden. Hinzu kommen die technologiebereinigten Neuinstallationen der Jahre 2014 mit 1.676,7 MW_p (1.863 MW_p [AEE 2016] bei einem Technologieanteil von 90 %) und 2015 mit 1.303,26 MW_p (1.498 MW_p [AEE 2016] bei einem Technologieanteil nach Kapitel 4.3 von 87 %).
- Erläuterung C: Für zukünftige Neuinstallationen wird zuvörderst auf die Ergebnisse des Kapitels 4.2.3 verwiesen, jedoch unter der Einschränkung, dass diese nicht technologiebereinigt sind. Hierfür werden die bereits ausführlich diskutierten Annahmen des Kapitels 4.3 bezüglich der Staffelung des Marktanteils der kristallinen Siliziumsolartechnologie angewandt. Für die Verrechnung mit annuellen Werten wird die vorgenommene Einteilung zwischen 2015 und 2020 für jedes Jahr linear interpoliert. Zur Berechnung der technologiebereinigten zukünftigen Neuinstallationen (exklusive der Schatteninstallationen) wird ferner auf Basis der

[137] Als Schatteninstallation eines Bezugsjahres werden in der vorliegenden Arbeit alle aus dem Ausfall oder Defekt von Modulen resultierenden Ersatzmodulinstallationen definiert. Auf Basis der Analyse der altersspezifischen Defektraten und der Struktur des herstellerseitigen Garantiekatalogs wird supponiert, dass alle Module, denen die Abfalleigenschaft innerhalb der ersten 25 Betriebsjahre zugeschrieben wird, ausgetauscht beziehungsweise ersetzt werden. Ab dem 26. Betriebsjahr wird eine 75 %-ige Austauschquote unterstellt. Dies ist letztlich die Konsequenz daraus, dass nicht jede defekte Altanlage tatsächlich ausgetauscht oder infolge eines Repowering ersetzt wird. Die Summe der ausgetauschten beziehungsweise ersetzten Altmodule wird im Jahr des Anfalls als Schatteninstallationen den technologiebereinigten Neuinstallationen additiv hinzugerechnet und erhöht sonach real die Grundgesamtheit jährlich neuinstallierter Module. Durch die reine Ersatzleistung tragen die Schatteninstallationen indessen nicht zu den statistisch ausgewiesenen jährlichen Neuinstallationen bei. Dies wird besonders bei der Angabe der gesamt installierten Leistung deutlich, da diese sonst um die Schatteninstallationen verfälscht wäre.

Erkenntnisse des Kapitels 4.2 und der Neuinstallationen des Jahres 2015 angenommen, dass sich die jährlichen technologieübergreifenden Gesamtinstallationen bis zum Erreichen des im NREAP angegebenen Ausbauziels von 52 GW_p unterhalb des definierten Ausbaukorridors auf dem Niveau von 2015 bewegen. Es wird folglich ein jährlicher Zubau der gesamten Photovoltaiktechnologie von 1,5 GW_p angenommen. Im Sinne der angestrebten Abfallprognose verringert sich dieser annuelle Wert um den technologiespezifischen Marktanteil und erhöht sich um die Schatteninstallationen. Mit Erreichen der 52 GW_p-Marke wird für das betreffende Jahr ein um die offene Differenz zur Gesamtinstallation technologiebereinigter und um die Schatteninstallationen erhöhter Wert zugrunde gelegt. Danach wird eine gleichbleibend geringe reale Neuinstallation kristalliner Siliziumsolarzellen von 100 MW_p je Jahr supponiert, welcher zuzüglich der Schatteninstallationen als jährliche Bezugsbasis dient. Dabei spielt der Marktanteil der kristallinen Siliziumsolartechnologie keine gewichtige Rolle, da ab diesem Zeitpunkt die geringen realen Neuinstallationen allgemach von den Schatteninstallationen dominiert werden. Abbildung 5-13 soll diesen Sachverhalt verdeutlichen.

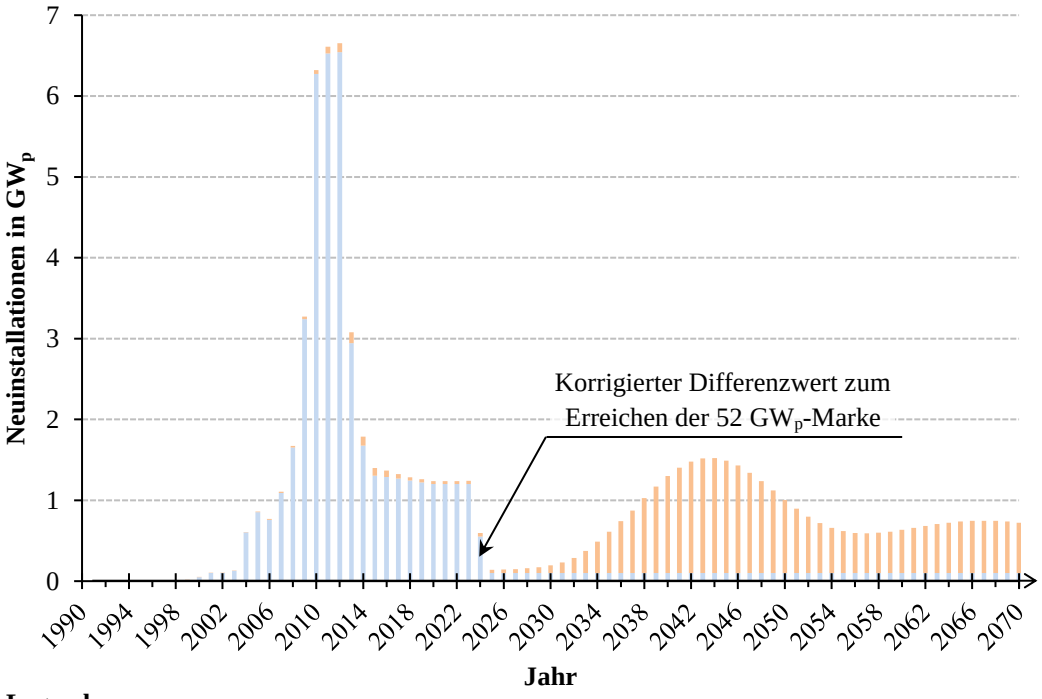


Abbildung 5-13: Technologiebereinigte jährliche Neuinstallationen und Schatteninstallationen von 1990 bis 2070.

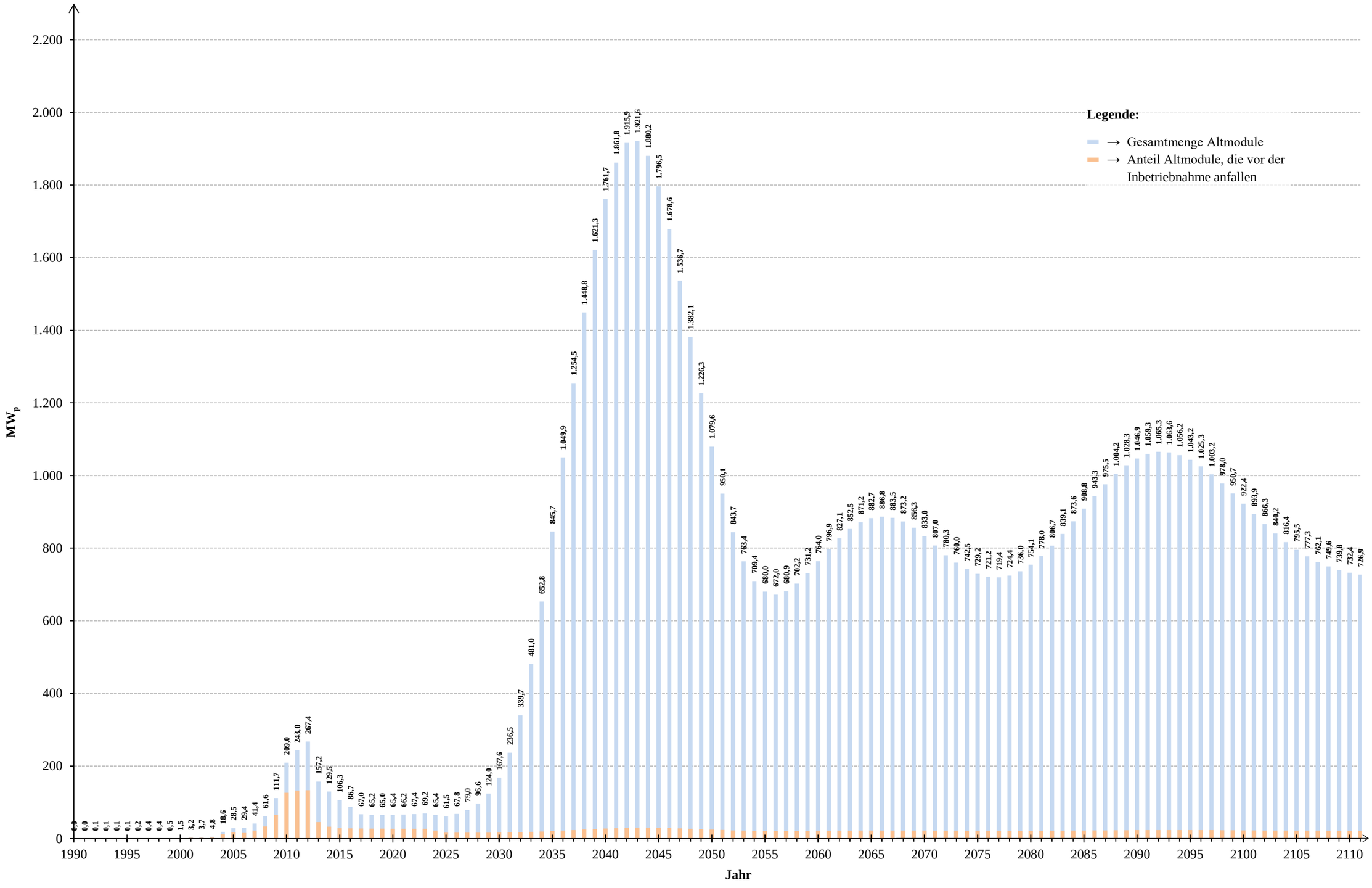
Die steigenden Beiträge zu den jährlichen technologiespezifischen Neuinstallationen nach Erreichen der 52 GW_p-Marke sind abzüglich des aus Vereinfachungsgründen als konstant angenommenen 100 MW_p Zubaus an Kapazitäten gänzlich auf Schatteninstallationen infolge von Repoweringmaßnahmen oder Ersatzleistungen zurückzuführen. Eine Wechselwirkung existiert indessen nicht nur bei den zukünftigen Installationsmengen. Die Erhöhung der Grundgesamtheit der jährlichen technologiespezifischen Neuinstallationen um die Schatteninstallationen wirkt sich auf die Quantität der Abfallströme aller auf ein Bezugsjahr sodann folgenden Jahre aus. Gleiches gilt für die Menge anfallender Altmodule im betrachteten Bezugsjahr selbst, wenngleich nur bedingt. Einerseits erhöht sich die Quantität des Abfallstroms im Bezugsjahr um den prozentualen Anteil der Transport- und Installationsschäden (t_i = 0) infolge der durch Ersatzinstallationen gestiegenen tatsächlichen Menge installierter Solarmodule. Andererseits fordert eine durch die Schatteninstallationen erhöhte und von den statistisch ausgewiesenen jährlichen Installationswerten abweichende reale Menge neuinstallierter Solarmodule keine statistische Anpassung der Produktionsmengen weil bereits enthalten.

- Erläuterung D: Neben den Abfallströmen aus Transport- und Installationsschäden sowie während der gesamten Nutzungsdauer eines kristallinen Siliziumsolarmoduls bis hin zum Erreichen der technischen Lebensdauer tragen auch die bereits diskutierten Produktionsausschüsse und –abfälle zum für ein Recycling zur Verfügung stehenden Stoffstrom bei. Grundlage bildet die Diskussion des Kapitels 4.7 zusammen mit der Tabelle 5-3 auf Seite 377. Die in dieser Tabelle ausgewiesenen prozentualen Werte werden mit den jährlichen Produktionsmengen der Modulhersteller multipliziert. Für die angestrebte Prognose der Abfallströme an Altmodulen sind an dieser Stelle nur die Ausschüsse an kristallinen Siliziumsolarmodulen direkt beim Modulhersteller relevant. Diese werden in ihrer Ausprägung additiv dem in einem Bezugsjahr verfügbaren Abfallstrom zugerechnet und erhöhen sonach die gesamte Altmodulmenge. Es gelten alle im Kapitel 4.7 getroffenen Einschränkungen und Annahmen vollumfänglich. Die für das Jahr 2013 ermittelte Gesamtproduktionsmenge kristalliner Siliziumsolarmodule in Deutschland von 1.473,25 MW_p wird dieserhalb für die Jahre 2014 bis 2018 als konstant angesehen. Für den Zeitraum nach 2018 unterliegen mögliche Prognosen zu den Produktionskapazitäten

und -mengen sehr hohen Unsicherheiten, da sich die Zukunft der deutschen Modulhersteller ab 2018 als höchlich imponderabel darstellt. Dies zielt gleichwohl auf die bereits stattgefundenen Marktverschiebungen der Herstellerkapazitäten in Richtung asiatisch-pazifischer Raum sowie die Tendenz des deutschen Marktes weg vom Massenmarkt und hin zum Spezial- oder Nischenmarkt für Ersatzmodule bestehender Anlagen (Nachbau benötigter Module zum Ersatz einzelner defekter Module der gleichen Spezifikation zur Vermeidung von Modulmismatching) ab [photovoltaik 2014]. Es ist darüber hinaus jedoch davon auszugehen, dass dieser „Ersatzteilmarkt“ zukünftig an Bedeutung gewinnt, nicht zuletzt mit dem altersbedingten Erreichen der technischen Lebensdauer bereits installierter Module. Aus diesen Gründen und auf Basis der getroffenen Annahmen im Kapitel 4.7 wird die jährliche Modulproduktionsmenge über das Jahr 2018 hinaus sowohl für Deutschland als auch innerhalb des ostdeutschen PV-Produktionsclusters als konstant angesetzt. Der statistische Fehler, der sich aus dieser Annahme möglicherweise ergibt, verliert für die Gesamtprognose mit steigendem Zeithorizont zunehmend an Bedeutung. Ab dem Jahr 2025 ist davon auszugehen, dass der Altmodulstrom aus installierten kristallinen Siliziumsolarmodulen stark zunimmt und ab 2035 einen permanenten Anteil an der jährlichen für ein Recycling zur Verfügung stehenden Gesamtmenge von mindestens 97,5 % aufweist.

Die konsequente Anwendung dieser Erläuterungen und der dahinter stehenden Annahmen sowie die logische Verknüpfung der Datenbasis zeitigt das auf der nachstehende Seite in Abbildung 5-14 im Querformat dargestellte Ergebnis: die Prognose absoluter Abfallströme aus Altmodulen für Deutschland inklusive der Produktionsausschüsse. Dabei sind sowohl historische / bereits eingetretene Altmodulströme als auch zukünftig zu erwartende Quantitäten aufgeführt, wobei die historischen Abfallströme aus demselben zugrunde liegenden Modell wie die zukünftigen Werte resultieren; sie basieren auf den gleichen Annahmen, sie nutzen die gleiche Datenbasis und den gleichen Berechnungsalgorithmus. Dieserhalb können die in der Abbildung 5-14 aufgeführten historischen Ausprägungen mit den bereits tatsächlich angefallenen und in verschiedenen Quellen möglicherweise belegten Mengen verglichen werden und so zur Validierung der Ergebnisse beitragen.

Abbildung 5-14: Prognose absoluter Abfallströme aus Altmodulen für Deutschland.



Für den Vergleich der Ergebnisse zu den historischen Abfallmengen steht allerdings nur eine äußerst begrenzte Anzahl an Quellen zur Verfügung, welche sich grundsätzlich in zwei Arten unterteilen lassen. Zum einen handelt es sich dabei um ältere Prognosen der Abfallströme. Diese nehmen entweder im Gros Bezug auf die Studie [Sander *et al.* 2007] aus dem Jahr 2007 oder basieren auf den bereits diskutierten stark vereinfachten und nicht stichhaltigen Annahmen wie beispielshalber einer definierten Lebenserwartung der Photovoltaikmodule von genau 20 Jahren.[138] Zudem ist ein Vergleich der Schätzmengen mit Quellen vor 2012 nicht zielführend, da bereits die Datenbasis der installierten jährlichen Kapazitäten stark von aktuellen Quellen und jener in dieser Arbeit verwendeten abweicht. Dies zeigt sich besonders darin, dass diese Quellen zumeist den tatsächlichen Trend bei den nationalen jährlichen Neuinstallationen ab 2012 nicht berücksichtigen konnten beziehungsweise mit einkalkulierten.[139] Die andere Art der für den Zweck der Validierung der Ergebnisse des eigenen Modells verfügbaren Quellen sind nach dem Jahr 2013 erhobene Statistiken vergangener realer Abfallströme oder nach dem Jahr 2013 entstandene Schätzungen auf Basis der Installationshistorie. [Wambach 2013] schätzt beispielshalber für den Zeitraum zwischen 2008 und 2012 eine jährliche Altmodulmenge zwischen 71 MW_p und 498 MW_p. Dies deckt sich weitestgehend mit den Ergebnissen aus Abbildung 5-14, worin für benannten Zeitraum ein jährlicher Altmodulstrom von 61,6 bis 267,4 MW_p angegeben wird. Verglichen mit den Angaben in [PV CYCLE 2016] für die Jahre 2011 bis 2015 scheinen die berechneten Werte der Abbildung 5-14 auf den ersten Blick zu hoch. Dies relativiert sich jedoch dahingehend, als dass die Angaben in [PV CYCLE 2016] einigen Einschränkungen unterliegen. [Lange 2015] gibt diesbezüglich an, dass die in diesen Statistiken ausgewiesenen Werte lediglich ein Prozent aller Module beinhalten, die im benannten Zeitraum ihr technisches Lebensende erreicht haben. Es handelt sich folglich fast ausschließlich um Produktionsausschüsse und Altmodule infolge von Transport- und Installationsschäden. Um beide Statistiken ansatzweise vergleichbar zu machen, müssen vorab die eigens berechneten Quantitäten um die Absenz der Module am technischen Lebensende korrigiert werden. Ein weiteres Problem beim Vergleich beider Statistiken sind die örtlichen Bezugsgrenzen. [PV CYCLE 2016] gibt lediglich Gesamtwerte für Europa unter Absenz der jährlichen nationalen Anteile an.

[138] An dieser Stellen seien beispielhaft [Beckmann 2010], [Friege und Kummer 2012a] und [Behrendt *et al.* 2010] benannt.

[139] Trotz falscher Datenbasis (aus heutiger Sicht) gleicht sich das Modell von [Sander *et al.* 2007] in der Prognose für das Jahr 2015 mit der berechneten Ausprägung der Abbildung 5-14.

Für die weitere Diskussion stellt Tabelle 5-6 die Angaben aus [PV CYCLE 2016] und die korrigierten Berechnungen auf Basis der Abbildung 5-14 gegenüber, wobei die Angaben aus [PV CYCLE 2016] mittels des im Kapitel 4.5.6.2 ermittelten Faktors von 84,39 g/W_p umgerechnet und an den angegebenen Technologieanteil von 80,9 % angeglichen wurden.

Tabelle 5-6: Gegenüberstellung der Angaben aus [PV CYCLE 2016] und Abbildung 5-14.

		Jahr				
		2011	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**
Quelle	**[PV CYCLE 2016]**	13,7	36,07	29,38	20,12	26,93
	Abbildung 5-14	132,18	133,05	45,52	32,62	28,73

Die starke Abweichung der Ergebnisse in den Jahren 2011 und 2012 lassen sich auf den bis dato geringen Marktanteil von PV Cycle weil erst 2007 gegründet und den damit geringen Zugriff auf die Gesamtheit anfallender Altmodule zurückführen. Dem gegenüber nähern sich beide Angaben mit steigender Marktdominanz von PV Cycle deutlich an. Ab 2013 zeigen sich gute Übereinstimmungen der mittels des Modells prognostizierten Abfallmengen und der in [PV CYCLE 2016] aufgeführten Werte (gelten für Europa). Nach Angaben von PV Cycle stellt Deutschland jedoch mit einem Anteil von rund 60 % den Hauptmarkt dar. Ein weiteres Indiz für die Stichhaltigkeit der in Abbildung 5-14 berechneten Prognose zeigt sich darin, dass diese Werte stetig über den Angaben von PV Cycle liegen. Dies ist auch zwingend notwendig, da es sich um die totale Summe aller in Deutschland anfallenden Module aus Produktionsausschüssen sowie Transport- und Installationsschäden handelt, wohingegen die Angaben in [PV CYCLE 2016] nicht allumfassend sein können und gleichwohl um den deutschen Marktanteil von circa 60 % nochmals nach unten korrigiert werden müssten.

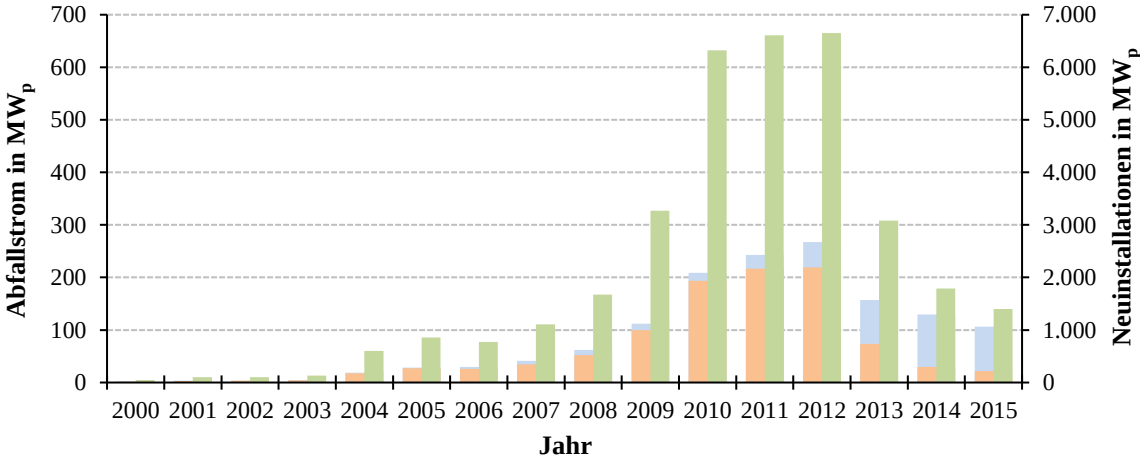
Eine weitere Möglichkeit zur Validierung der Ergebnisse gibt [Sander *et al.* 2004]. Diese Studie stellt eine der singulären Prognosen dar, die eine Absterbekurve der betreffenden Module beinhaltet. Allerdings unterliegen die Angaben dieser Studie den gleichen altersbedingten Problemen. Für die darin prognostizierten Werte ab 2007 fehlt schlicht die unvorhergesehene Entwicklung des deutschen Marktes der jährlichen Neuinstallationen, weshalb lediglich der in der Studie explizit aufgeführte Wert für 2002 eine adäquate Vergleichsmöglichkeit darstellt. Dieser Vergleich liefert jedoch eine sehr gute Übereinstimmung mit 3,44 MW_p und den in Abbildung 5-14 angegebenen 3,7 MW_p.

Letztlich soll noch die Abfallprognose aus [Cucchiella *et al.* 2015] zur Überprüfung der eigenen Ergebnisse herangezogen werden. Diese Studie unterscheidet sich von den vorbenannten Quellen dahingehend, als dass der Gesamtaltmodulstrom explizit in Altmodule, die ihr technisches Lebensende erreicht haben, und Produktionsausschüsse unterteilt wird. Wennzwar [Cucchiella *et al.* 2015] sich auf Altmodulströme in Italien bezieht, lässt der Vergleich doch einige interessante Rückschlüsse zu. Zum einen wird bezüglich der Produktionsausschüsse ebenfalls ein konstantes Langzeitverhalten zugrunde gelegt. Zum anderen zeigt sich ein ähnlicher Trend im Verlauf der Abfallprognosen. Obschon die in der Studie aufgeführten Ergebnisse zwar nicht in der absoluten Quantität mit der Prognose der deutschen Altmodulströme komparabel sind, zeigt sich eine gute Übereinstimmung im prognostizierten Trend der Gesamtabfallströme. Ein Vergleich der Trends beider nationaler Abfallströme ist deshalb zulässig, da sich der Trend der Datenbasis – jährlich national neuinstallierte Kapazitäten – für beide Länder stark ähnelt (siehe Kapitel 4.2.1 und 4.2.2). Beide Prognosen zeigen einen lokalen Peak im Zeitraum der nationalen Rekordinstallationen (Deutschland 2010 bis 2013, Italien 2010 bis 2012), woran sich in beiden Fällen ein Tal bezüglich der Quantität des Altmodulstroms über rund 14 Jahre anschließt und letztlich ab dem Jahr 2027 in stark ansteigenden Werten ufert. Zudem zeigt sich in beiden Prognosen ab dem Jahr 2024 ein am Gesamtabfallstrom steigender Anteil der Altmodule, die ihr technisches Lebensende erreicht haben.

Wie ist die Prognose der absoluten Abfallströme aus Altmodulen der Abbildung 5-14 zu deuten, welche Abhängigkeiten gibt es und wie sind die lokalen sowie globalen Extremwerte zu erklären?

Zur Beantwortung der Fragen und zur adäquaten Diskussion ist die Prognose in mehrere Teilabschnitte zu segmentieren. Das erste Segment soll die historischen Werte bis einschließlich dem Jahr 2015 umfassen. Bei dessen Betrachtung fällt besonders das lokale Maximum zwischen den Jahren 2010 und 2013 auf. Dieser Peak lässt sich eindeutig auf die Historie der nationalen jährlichen Neuinstallationen in Verbindung mit den hohen prozentualen Anteilen der Transport- und Installationsschäden sowie der Kinderkrankheiten zurückführen; er setzt sich sonach hauptsächlich aus den Transport- und Installationsschäden sowie aus den vergleichsweise hohen Defektraten infolge der Kinderkrankheiten zusammen.

Nachstehende Abbildung 5-15 soll diesen Zusammenhang verdeutlichen, indem für den betrachteten Zeitraum (aus Gründen der Darstellbarkeit beginnend mit dem Jahr 2000) die jährlichen Neuinstallationen den berechneten Ausprägungen des Gesamtabfallstroms zusammen mit dem Anteil der Transport- und Installationsschäden sowie der Kinderkrankheiten gegenübergestellt werden.



Legende:

(Säulen) → berechneter Gesamtabfallstrom (linke Achse)
(Säulen) → Anteil Transport- und Installationsschäden sowie Kinderkrankheiten am berechneten Gesamtabfallstrom (linke Achse)
(Säulen) → jährliche technologiebereinigte Neuinstallationen (rechte Achse)

Abbildung 5-15: Gegenüberstellung des berechneten Abfallstroms; des Anteils an Transportschäden, Installationsschäden und der Kinderkrankheiten; sowie der jährlichen Neuinstallationen für Deutschland zwischen 2000 und 2015.

An dieses lokale Maximum schließt sich für den Zeitraum zwischen den Jahren 2016 bis 2027 ein in seinen Ausprägungen als konstant anzusehendes Tal geringer jährlicher Gesamtabfallströme an. Dieses Tal resultiert aus der Wechselwirkung der im Modell angenommen geringen Neuinstallationen für den betreffenden Zeitraum und den Folgen der geringen Neuinstallationen zwischen 1990 und 2008. So erreichen zwar die ersten Module, die seit 1990 installiert wurden, allgemach den Bereich des maximalen Anstiegs der zugehörigen Weibullverteilung, aufgrund der sehr geringen absoluten historischen Neuinstallationen vor 2008 effizieren diese jedoch nur marginale jährliche Altmodulströme von durchschnittlich 44,62 MW_p (2016 bis 2027). Die restlichen rund 20 MW_p an jährlichen Altmodulströmen ergeben sich aus den konstanten Produktionsausschüssen sowie aus den Transport- und Installationsschäden, welche sich ebenfalls ob der als gering angenommenen Neuinstallationen als lässlich erweisen. Gleichwohl zeitigen auch mögliche Schatteninstallationen, wie aus Abbildung 5-13 (Seite 419) zu ersehen, keine wesentliche Erhöhung der real neuinstallierten Module. Zudem bewirken die nationalen

Rekordinstallationen zwischen 2009 und 2012 ebenfalls nur vernachlässigbar kleine Beiträge zu den jährlichen Gesamtaltmodulströmen im betrachtungsrelevanten Zeitraum 2016 bis 2027), da sich jene Module nach Abbildung 5-11 im Bereich der konstant niedrigen Defektraten bewegen (Einzelbeiträge nur infolge des Grundrauschens) und per Definition frühestens im Jahr 2030 singulär ihr technisches Lebensende erreichen. Letztlich bleibt jedoch zu beachten, dass ob der imponderablen zukünftigen Entwicklung der nationalen jährlichen Neuinstallationen auch ein erhöhter Beitrag ähnlich des im ersten beschriebenen Segments der Prognose existenten lokalen Peaks bedingt durch den Anteil der vergleichsweise hohen Transport- und Installationsschäden erfolgen kann, wenngleich sich dieses Szenario den Ausführungen des Kapitels 4.2 folgend als höchlich unwahrscheinlich darstellt.

Die bereits mehrfach erwähnten nationalen Rekordinstallationen zwischen 2009 und 2012 wirken sich erst ab dem Jahr 2035 signifikant auf den Altmodulstrom aus. Dies äußert sich besonders deutlich im daraus resultierenden globalen Maximum der Prognose des absoluten annuellen Altmodulaufkommens. Dieses globale Maximum soll daher auch den dritten Abschnitt der segmentierten Diskussion abgrenzen: den Zeitraum zwischen 2028 bis 2050. Dieses Segment nimmt nicht nur aufgrund der Existenz des globalen Maximums, sondern auch ob einiger Spezifika eine Sonderstellung bei der Diskussion der gesamten Abfallprognose ein. Zum einen tritt der enorme Zuwachs prognostizierter Altmodule im Zeitraum der angenommen konstant niedrigen jährlichen Neuinstallationen von 100 MW_p ein. Zum anderen steigt der Anteil der Altmodule, der örtlich beim Nutzer anfällt, auf ein kontinuierliches Höchstmaß an. Dies führt in der Konsequenz zusätzlich zu einem eminenten Anstieg der jährlichen Schatteninstallationen innerhalb des betrachteten Abschnittes, was schließlich ebenfalls in deren absoluten Rekordwerten ufert. In toto lässt sich jedoch festhalten, dass das prognostizierte Maximum der jährlichen Altmodulströme auf den Bereich des größten Anstiegs der spezifischen Weibullverteilung der Module zurückzuführen ist, welche im Zeitraum der historischen Rekordinstallationen zwischen 2009 und 2012 in Betrieb genommen wurden. Zum besseren Verständnis sind auf der nachstehenden Seite alle absoluten Einzelwerte, die sich aus der Multiplikation der vom Installationszeitraum abhängigen spezifischen Absterbekurve (Abbildung 5-11) eines jeden Installationsjahres und der entsprechenden jährlichen realen absoluten Neuinstallationen (inklusive Schatteninstallationen) ergeben, in der Abbildung 5-16 im Querformat als Farbcodierung der abhängigen Werte aufgeführt.

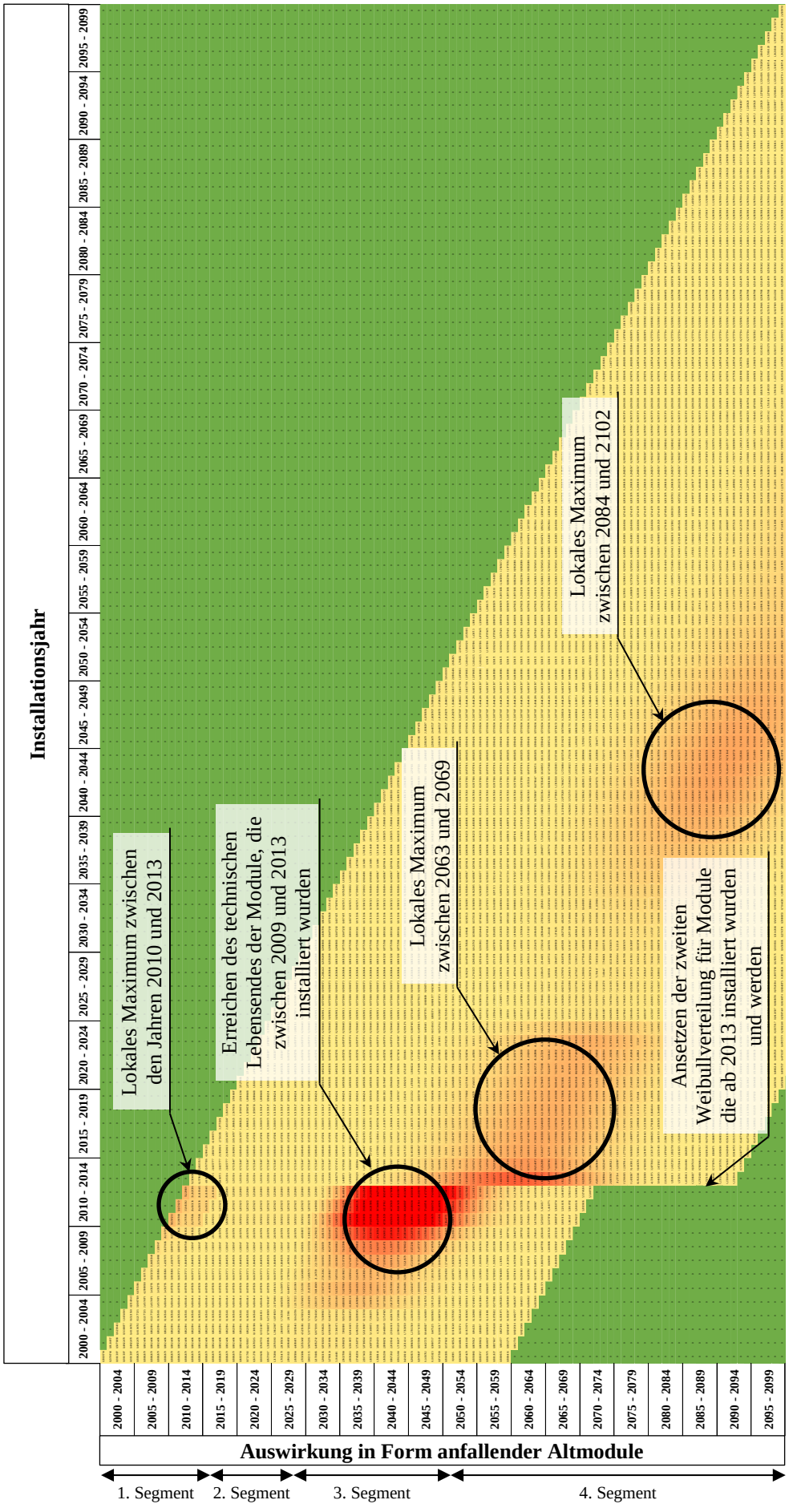


Abbildung 5-16: Auswirkung der annuellen Neuinstallationen (inklusive Schatteninstallationen) in Form jährlich anfallender Altmodule in Deutschland als Farbcodierung der Einzelbeiträge.

In der Abbildung 5-16 sind alle Einzelbeiträge von Altmodulen zum jährlichen Gesamtabfallstrom in Abhängigkeit des ursprünglichen Installationsjahres dargestellt (exklusive Produktionsausschuss sowie Transport- und Installationsschäden). Zentrale Aussage der Abbildung ist jedoch nicht die Lesbarkeit der Einzelwerte, sondern das sich aus der Höhe der einzelnen Werte ergebende Farbschema. Dies soll Zusammenhänge ähnlich des Ursache-Wirkungs-Prinzips identifizieren helfen. Wie der Legende zu entnehmen ist, kennzeichnen grün eingefärbte Werte wirkungsfreie Einzelbeiträge; entweder zeitigen die zugrunde liegenden Installationen keine Auswirkung in Form anfallender Altmodule für die entsprechende Ordinate (grüner Bereich am unteren linken Rand), oder es existiert keine Ursache, aus der eine Wirkung resultieren kann (grüner Bereich oben rechts). Alle Wirkungen, gleichwohl welcher Ausprägung, sind anders-farbig hinterlegt. Diesbezüglich kommt eine Farbcodierung der abhängigen Werte zur Anwendung, wobei eine gelbe Kennzeichnung kleinste Auswirkungen signalisiert und rot gekennzeichnete Werte sich der farblichen Signalwirkung bedienen und maximale Auswirkungen markieren. Für Werte, die zwischen der minimalen Ausprägung (gelb) und der maximalen Ausprägung (rot) liegen, sind die Übergänge fließend. Die Neuinstal-lationen aus den Jahren 2009 bis 2012 effizieren sonach eine extreme Auswirkung im Zeitraum zwischen 2035 und 2052 in Form einer Ballung von hohen Einzelbeiträgen zum jährlichen Gesamtaltmodulstrom; in Summe ergibt sich daraus das globale Maximum der Prognose. Zudem ist der Abbildung 5-16 für den Zeitraum der Rekordinstallationen zwischen 2009 und 2012 eine weitere, wenngleich wesentlich geringere Auswirkung zuzuordnen (erkennbar an den leicht orange eingefärbten Werten): der bereits in der Diskussion des ersten Segments betrachtete lokale Peak zwischen 2010 und 2013. Wie zu Beginn der Diskussion des dritten Segments angeschnitten, muss aus der extremen Ausprägung der jährlichen Altmodulströme per Definition eine hohe Anzahl jährlicher Schatteninstallationen folgen. Dies wird durch den Vergleich mit der Abbildung 5-13 auf Seite 419 bestätigt, worin für den Zeitraum zwischen 2038 bis 2050 ebenfalls Rekordausprägungen der annuellen Schatteninstallationen ausgewiesen sind. Diese übersteigen die zugrunde liegenden jährlichen Neuinstallationen von 100 MW_p um etwas mehr als das 14-fache; machen dementsprechend maximal 93,44 % der realen Gesamt-neuinstallationen kristalliner Siliziumsolarmodule eines Jahres aus. Ein weiteres und nicht minder wichtigeres Resultat der Betrachtung ist, dass sich im untersuchten Segment eine deutliche Verlagerung bei der Verortung der Altmodulquellen ergibt. Durch das Erreichen des technischen Lebensendes des Gros der Module, die im Zeitraum des

Rekordzubaus installiert wurden, und dem sich daraus ergebenden globalen Maximums der Prognose jährlicher Altmodulströme in Deutschland erhöht sich der Anteil der direkt am Anlagenstandort anfallenden Altmodule am jährlichen Gesamtaltmodulstrom allgemach aber stetig auf Werte über 96,9 % ab dem Jahr 2034. Waren bis 2015 noch Produktionsausschüsse sowie Transport- und Installationsschäden Hauptquellen von Altmodulen, zeigt sich ab 2034 besagte kontinuierliche Dominanz der Altmodule, die direkt am Standort der Anlage anfallen.

An das globale Maximum der Prognose schließt sich ein, bezogen auf die jährlichen Altmodulströme, unsteter und in die Zukunft offener Zeitraum an: das vierte Segment der Prognose. Auf das zuvor beschriebene globale Maximum folgen mehrerer lokale Minima und Maxima, wobei sich ein im Rahmen dieses Segments globales Minimum unmittelbar nach dem Jahr 2051 darbietet. Wenngleich dieses Minimum von vielen unsicheren Faktoren abhängig ist, kommt ihm eine entscheidende Rolle zu. Sollte dessen Existenz eine Daseinsberechtigung besitzen, ergibt sich daraus je nach Ausprägung eine Brisanz für ein mögliches Recycling unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Gleiches gilt für die nachfolgenden Minima, deren Ausprägungen jedoch ebenfalls mit großen Unsicherheiten behaftet sind weil in ferner Zukunft liegend. In Verbindung mit der Abbildung 5-16 zeigt sich jedoch eindeutig, dass das vorbezeichnete Minimum zwischen 2052 und 2061 ein Artefakt des Modells ist und sich aus der Differenzierung der Modulgruppen nach dem Installationszeitraum durch die beiden Weibullverteilungen ergibt. Bei einem in der Realität fließend stattfindenden Übergang der Technologieentwicklung (besonders hinsichtlich des neuralgischen Verhaltens) würde sich besagtes Minimum nicht nur abschwächen, es würde gänzlich ausgelöscht. Als geeignetes Werkzeug zur weiteren Untersuchung der möglichen Existenz dieses Minimums bietet sich eine Sensitivitätsanalyse der Einflussparameter an. Diese findet sich im nachstehendem Unterkapitel 5.2.2.3: „Sensitivitätsanalyse ausgewählter Parameter“, weshalb an dieser Stelle auf die dort stattfindende Diskussion verweisen wird. Gleiches gilt entsprechend für das sich direkt anschließende lokale Maximum zwischen 2063 und 2069.

Das zweite prognostizierte lokale Minimum dieses Segments zwischen den Jahren 2070 und 2083 resultiert aus den geringen realen Gesamtneuinstallationen der Jahre 2024 bis 2030, was die geringen Schatteninstallationen für diesen Zeitraum mit einbegreift (vergleich Abbildung 5-13 auf Seite 419). Dieses Ursache-Wirkungs-Prinzip lässt sich direkt aus der Abbildung 5-16 ablesen. Ebenfalls direkt aus der Abbildung 5-16 lässt sich

die Ursache des lokalen Maximums zwischen 2084 und 2102 entnehmen. Es zeigt sich eine klare Abhängigkeit von den Installationen zwischen 2039 und 2049. Laut Abbildung 5-13 setzten sich diese jährlichen Neuinstallationen fast ausschließlich aus Schatten-installationen zusammen. Wie zuvor bereits angegeben, entspricht dieser Zeitraum genau dem Zeitraum der Rekordausprägungen der annuellen Schatteninstallationen, was wiederum eindeutig auf das globale Maximum der Abfallprognose zurückzuführen ist. Diese aus dem Erreichen des technischen Lebensendes der Module, die zwischen 2009 und 2012 installiert wurden, hervorgehenden Rekordschatteninstallationen erreichen nun abermals ihr, durch die zweite Weibullverteilung definiertes technisches Lebensende. Ergo liegt die Ursache für das betrachtete lokale Maximum zwischen 2084 und 2102 in der nationalen Installationshistorie, genauer den nationalen Rekordinstallationen zwischen 2009 und 2012. Mit Blick auf die Prognose der jährlichen Altmodulströme lassen sich sonach die folgenden drei Auswirkungen auf die nationalen Rekord-installationen zwischen 2009 und 2012 als Ursache zurückführen:

- der beschriebene lokale Peak im ersten Segment,
- das globale Maximum der gesamten Prognose (drittes Segment) und
- das just diskutierte lokale Maximum im vierten Segment zwischen 2084 und 2102.

Allgemein stellt sich das gesamte vierte Segment jedoch als höchlich imponderabel dar. Die zugrunde liegende Datenbasis ist von vielen Unsicherheiten geprägt, wobei das Fehlermaß mit steigender zeitlicher Entfernung wächst. Dieserhalb erscheint eine Betrachtung absoluter Werte für diesen letzten Teilabschnitt als nicht zielführend, vielmehr sollte eine Diskussion der sich darbietenden Trends sowie der damit verbundenen Risiken und Chancen im Vordergrund stehen. Hierfür erscheint eine Unterscheidung in zwei Planungshorizonte als sinnvoll:

- Eine kurz- bis mittelfristige Planungsphase, welche das erste und das zweite Segment der Prognose umfasst und sonach bis zum Jahr 2027 währt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse und der bisherigen Diskussion ist das tatsächliche Eintreten der prognostizierten absoluten jährlichen Altmodulströme innerhalb dieses Planungshorizontes als hoch wahrscheinlich anzusehen.
- Eine Langzeitplanung, welche im Jahr 2028, zusammen mit dem dritten Segment der Prognose, ansetzt und ein zeitlich offenes Ende aufweist. Hierbei stehen nicht die absoluten Werte im Vordergrund, sondern darauf zurückzuführende Trends.

Die berechneten jährlichen Altmodulströme im zweiten Segment der Prognose und damit im kurz- bis mittelfristigen Planungshorizont stellen sich bei einer ganzheitlichen Betrachtung der Abbildung 5-14 als vergleichsweise gering dar; der durchschnittliche jährliche Altmodulstrom des vierten Segments liegt um das 12-fache höher. Infolge der geringen Quantität der jährlichen zur Verfügung stehenden Altmodulmengen bis einschließlich dem Jahr 2027 sowie der regionalen Streuung (prognostizierte Altmodulströme gelten für das gesamte deutsche Staatsgebiet) eignet sich diese Periode nicht zur Initialisierung eines wirtschaftlich und ökologisch sinnvollen Recyclingprozesses. Dies wird auch durch Expertenmeinungen wie [Wambach 2014] und [Brellinger 2014] bestätigt, die eine Mindestmenge von jährlich circa 20.000 t (entspricht rund 237 MW_p je Jahr; umgerechnet mittels des im Kapitel 4.5.6.2 ermittelten Faktors von 84,39 g/W_p) annehmen. Zum Vergleich: der durchschnittliche jährliche Altmodulstrom für Gesamtdeutschland zwischen 2016 und 2027 beträgt 68,82 MW_p, wohingegen dieser Wert im vierten Segment der Prognose 846 MW_p aufweist. Der kurz- und mittelfristige Planungshorizont bis zum Jahre 2027 sollte dieserhalb indessen zur Konkretisierung der Prognose für die darauffolgende Langzeitplanung genutzt werden. Zudem ist der Fokus besonders darauf zu legen, dass:

- der Zeitraum für intensive Studien zum Langzeitverhalten der Module (speziell zum neuralgischen Verhalten und hinsichtlich der Defektraten sowie zur Schaffung einer fundierten Wissensbasis bezüglich des Erreichens des technischen Lebensendes der verschiedensten Module) genutzt wird, um Schätzungen oder Berechnungen zukünftiger Altmodulströme im dritten und vierten Segment der Prognose zu optimieren. Dies zielt zuvörderst auf die Lage und Ausprägung der Extrempunkte sowie deren Existenz ab. Speziell die für die Wirtschaftlichkeit etwaiger Recyclingprozesse brisanten lokalen Minima im vierten Segment der Prognose bedürfen einer gezielten Untersuchung. Infolge einer bis dato breiteren zur Verfügung stehenden Wissensbasis steigt die Qualität der gesamten nachgelagerten Prognose, wodurch letztlich die etwaigen Minima besser prognostizierbar sind und sonach wirtschaftliche Risiken eines Recyclingprozesses für kristalline Siliziumsolarmodule gesenkt werden können.
- eine Verstetigung der gesamten kristallinen Siliziumsolartechnologie mit Blick auf die Modulkonzeption ermöglicht wird. Dies zielt vornehmlich auf die Kostensenkung der Recyclingprozesse ob der Reduzierung der Modulvariationen (Zellendicke, Zellenaufbau, Zellenzahl je Modul, Abmaß der Module und

Variation der Ingredienzien) und damit einhergehend einer Verbreiterung der für spezifische Recyclingprozesse verfügbaren Modulspezifikationen ab. Möglich sind ebenfalls Kostenreduktionen der Recyclingprozesse infolge deren technologischen Simplifizierung aufgrund einer Vereinheitlichung der Konstruktionsmerkmale der Module oder letztlich einer recyclingorientierten Modulkonzeption. Dieser Aspekt ist Gegenstand des Kapitels 5.5, weshalb für weiterführende Informationen auf die dortige Diskussion verwiesen wird.

- eine verstärkte Technologieforschung im Bereich der Recyclingprozesse erfolgt. Die Ziele sollten neben der Technologieforschung selbst sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte der Prozesse umfassen. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit etwaiger Recyclingprozesse existieren dabei mehrere Ansatzpunkte: die Inputseite, die Prozessgüte inklusive der Effizienz sowie der Output in Abhängigkeit des jeweiligen Absatzmarktes. Inputseitig können universelle (modulkonzeptionsübergreifende) Ansätze ob der Vielzahl installierter Variationen kristalliner Siliziumsolarmodule und der bereits beschriebenen steten Entwicklung der Technologie gemeinsam mit der, auf neuen Erkenntnissen basierenden, fortlaufenden konzeptionellen Anpassung der Module Vorteile aufweisen, da sie ein breites Spektrum der verfügbaren Modulkonzeptionen nutzen können. Für Prozesse, die inputseitig nur hinsichtlich einzelner Modulspezifikationen ausgelegt sind, reduziert sich der Markt verfügbarer Quellen nicht nur gesamtheitlich quantitativ, er kann aufgrund der regionalen Installationshistorie auch örtlich differieren oder mitunter auch zeitlich befristet Existent sein (vergleich hierzu Kapitel 6.1: „Problematik der Zeitverschiebung zwischen Produktions- und Recyclingtechnologien“). Dementsprechend sinkt für universelle Ansätze der Einzugsradius zur Generierung des minimal benötigten jährlichen Massenstroms, was bedeutende Kostenvorteile effizieren kann. Eine Kostensenkung und damit ein vom verfügbaren Massenstrom abhängiger Zeitpunkt zur Initiierung eines wirtschaftlichen Recyclings kristalliner Siliziumsolarmodule kann auch durch eine Verbesserung / Fortentwicklung der einzelnen Prozessschritte erzielt werden. Ein häufig genutztes Mittel ist die Steigerung der Effizienz. Dies kann wiederum durch eine Optimierung des Aufwandes (Minimalprinzip), des Ergebnisses (Maximalprinzip) oder deren Verhältnis (Optimumprinzip) erfolgen. Neben einer potenziellen Kostenreduktion ist mittels der drei Ausprägungen des ökonomischen Prinzips auch eine

Verbesserung der Prozessbilanz hinsichtlich etwaiger ökologischer Auswirkungen erdenklich. Generell sollte im Zuge dieser verstärkten Forschungsphase, abgesehen von der notwendigen Bedingung der Wirtschaftlichkeit solcher Prozesse, auch dem ökologischen Aspekt eine weitreichende Bedeutung zukommen. Mögliche Ansatzpunkte[140] sind beispielshalber eine Minimierung eventueller Sekundäremissionen, die Bildung geschlossener Kreisläufe von Betriebsmitteln (Chemikalienbad), die Generierung verwertbarer Rückstände et cetera. Letztlich ist der Blick auf den Output etwaiger Recyclingprozesse kristalliner Siliziumsolarmodule zu richten. Hier können spezialisierte Ansätze durchaus Vorteile gegenüber universellen Lösungen aufweisen. Einerseits sind, unabhängig des Spezialisierungsgrades, die gesetzlichen Mindestquoten zur Verwertung und zum Recycling einzuhalten (wie bereits in Kapitel 5.1.2 auf Seite 336ff diskutiert, sind selbst die für den offenen Geltungsbereich des ElektroG2 ab dem 15. August 2018 vorgegebenen Mindestquoten bezüglich eines ökologisch sinnvollen Recyclings als kritisch zu betrachten, da die enthaltenen Funktionsmaterialien nicht ausreichend erfasst werden), andererseits die qualitativen Anforderungen des jeweiligen Absatzmarktes zu gewährleisten. Dabei gilt es zwischen brancheninternen und –externen Absatzmärkten zu unterscheiden. Branchenintern drängt sich eine Wiederverwendung ganzer Zellen beziehungsweise Wafer auf, da sich hierdurch der SV_3 nach Tabelle 4-26 des Kapitels 4.5.6 auf Seite 285 reduziert und globale Auswirkungen auf die gesamte Produktionsbilanz eines $gSSM_{sc/mc}$ zeitigt. Dies geht mit einer Kostenreduktion in der Produktion einher, da sowohl die energieintensive Raffination des Siliziums als auch der mit starken abrasiven Materialverlusten behaftete Prozess der Wafervereinzelung entfällt. Für den branchenexternen Markt scheint die Gewinnung ganzer Zellen oder Wafer aus dem Recyclingprozess als kaum zielführend. Vielmehr ist eine sortenreine Aufteilung der Ingredienzien je nach den geforderten Reinheiten des jeweiligen Absatzmarktes anzustreben, was im Gegensatz zur Rückgewinnung ganzer Zellen oder Wafer einen völlig anderen Anspruch an die dafür benötigten Prozesse stellt. Je nach Absatzmarkt können dementsprechend eminente Unterschiede in den Anforderungen an Form, Zusammensetzung und Reinheit des Outputs der Recyclingprozesse existieren,

[140] Die Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Zudem stellt die Reihenfolge keine Gewichtung dar.

weshalb sich in Verbindung mit den jeweils vorherrschenden Marktbedingungen sowie der erforderlichen Prozessparameter unterschiedliche Gewinnmargen ergeben. Gleichwohl besteht die Möglichkeit der Ausbildung einer Sammel-, Sortier- und/oder zum weiteren Recycling einzelner Teile Vorbereitungs-, Demontage- und Separationsindustrie. Der Identifikation etwaiger Absatzmärkte ist sonach ebenfalls ein enormer Stellenwert im Zusammenhang mit der Technologieforschung während der kurz- und mittelfristigen Planungsphase zuzuschreiben. Für weitere Informationen diesbezüglich wird auf das Kapitel 5.4.2.2: „Absatzmärkte Sekundärrohstoffe“ verwiesen.

- die während der kurz- und mittelfristigen Planungsphase anfallenden Altmodule für die vorbenannten Forschungs- und Studienzwecke zugänglich sind und dementsprechend verstärkt zielführend genutzt werden.

Darüber hinaus zeigt sich keine, in der Ausprägung vergleichbare Dominanz der Altmodulquellen wie im langfristigen Planungshorizont. Die Altmodule fallen entweder okkasionell und dem Grundrauschen geschuldet am Anlagenstandort an oder entspringen einem steten Strom von Produktionsausschüssen, hohen Anteilen an Transport- und Installationsschäden zusammen mit Gewährleistungs- und Garantiefällen in der frühen Nutzungsphase. Hierbei wird vereinfachend unterstellt, dass die Transport- und Installationsschäden ebenfalls beim Hersteller anfallen. Dies leitet sich aus der getroffenen Definition dieser Schadensgruppe ab, da deren Austausch vor der Inbetriebnahme erfolgt und einen unmittelbaren Rücktransport effiziert. Es ist demnach davon auszugehen, dass die Quelle des Gros der Altmodule im kurz- bis mittelfristigen Planungshorizont örtlich mit den Standorten der Produzenten nach Kapitel 4.7: „Übersicht Produzenten“ korreliert. Dies stellt einen essenziellen Unterschied zum langfristigen Planungshorizont dar, wo der Anteil der Altmodule, der direkt am Anlagenstandort oder bei den Sammelstellen der örE anfällt, ab dem Jahr 2034 stetig 96,9 % übersteigt.

Mit Beginn des dritten Segments und dem prognostizierten starken Anstieg der Altmodulströme ab 2030 kann von einem jährlichen Massenstrom ausgegangen werden, der in seiner Quantität einen wirtschaftlichen Recyclingprozess zulässt. Wichtig für die langfristige Planungsphase sind die Lage und die Ausprägung der lokalen Minima, da sie wirtschaftliche Risiken darstellen können. Gleichwohl kann den Prognosewerten direkt ein Zeitpunkt entnommen werden, ab wann sich ein wirtschaftlicher Recyclingprozess

(bei Kenntnis der minimal benötigten jährlichen Altmodulmenge) initialisieren lässt. Wie jedoch bereits angedeutet, unterliegen die absoluten Werte im langfristigen Planungshorizont erheblichen Unsicherheiten, weshalb eine Untersuchung der sich daraus ergebenden Trends und Tendenzen wichtige Erkenntnisse zulässt und die Diskussion argumentativ unterstützen kann. Zur Beschreibung dieser Trends und zur Überprüfung der Stichhaltigkeit der Prognose im Zeitraum ab 2028 bietet sich eine Sensitivitätsanalyse an.

5.2.2.3 Sensitivitätsanalyse ausgewählter Parameter

Grundlage der Sensitivitätsanalyse bildet das zuvor beschriebenen Modell zur Berechnung der jährlichen absoluten Altmodulströme, dessen Ergebnisse in Abbildung 5-14 auf Seite 422 (A3-Querformat) abgebildet sind. Untersuchungsgegenstand sind alle Variablen der Prognose, scilicet die Form- und Lageparameter beider Weibullverteilungen, die geschätzten zukünftigen jährlichen Neuinstallationen sowie deren Wechselwirkungen. Wenngleich die geschätzten zukünftigen nationalen Produktionsausschüsse die annuellen Gesamtaltmodulströme beeinflussen und infolge der zugrunde liegenden Annahmen ein hohes Fehlerpotenzial aufweisen, werden sie nicht in die Gruppe der zu untersuchenden Variablen mit einbegriffen. Sowohl der Fehler als auch der mögliche reale absolute Differenzbetrag egalisieren sich im Zuge der zeitlich fortschreitenden Prognose, da diese Altmodulquelle in der Langzeitplanungsphase nur einen marginalen Anteil am prognostizierten absoluten jährlichen nationalen Gesamtaltmodulstrom stellt.

Alle zu untersuchenden Variablen werden im Sinne der Sensitivitätsanalyse um ein Drittel bezogen auf ihren jeweiligen Grundwert erhöht und gesenkt. Eine Verringerung der Lageparameter beider Weibullverteilungen und damit eine Verkürzung der technischen Lebensdauer der betreffenden kristallinen Siliziumsolarmodule erscheint jedoch der vorangegangenen Diskussion folgend als höchlich unwahrscheinlich.

Da das erste Segment der absoluten Prognose auf historischen und nachgewiesenen Werten basiert, stellen die Parameter der Weibullverteilung, die die technische Lebensdauer von vor 2013 installierten Modulen definiert, diesbezüglich den einzigen Untersuchungsgegenstand dar. Wie bereits diskutiert, sind die realen technologiebereinigten Neuinstallationen vor 2008, verglichen zur Gesamtprognose, indessen so

gering, dass eine Änderung der Parameter der zugehörigen Weibullfunktion nur marginale Auswirkungen im betreffenden Zeitraum bis zum Jahr 2015 zeitigt. Für die Rekordinstallationen zwischen den Jahren 2009 und 2012 kann rein definitionsbedingt kein Einfluss der Parametervariation auf die Prognose jener absoluten Werte erfolgen. Sonach kann das erste Segment der Gesamtprognose aus der Analyse exkludiert werden. Ein ähnliches Ergebnis zeigen die Veränderungen der absoluten Werte der Prognose im zweiten Segment bezüglich der Variation der Einflussparameter. Aufgrund der Dominanz des Anteils der direkt am Anlagenstandort anfallen Altmodule am Gesamtaltmodulstrom ab dem zweiten Prognosensegment zeigt sich nach der Modifizierung aller Variablen in keinem Fall eine nennenswerte Reaktion, ausgenommen einer leichten „Linksverschiebung“ des Anstiegs der jährlichen Altmodulströme auf Werte über 100 MW_p – nimmer jedoch vor dem Jahr 2026. Diese Erkenntnis stellt das erste wichtige Ergebnis der Sensitivitätsanalyse dar, da die Ausprägung des zweiten Segments und damit der Zeitraum, indem kein wirtschaftliches Recycling kristalliner Siliziumsolarmodule erfolgen kann, nicht von den Variablen abhängig ist. Die Prognose der absoluten Altmodulströme im zweiten Segment ist demnach als realitätsnah und der prognostizierten Ausprägungen nach im Eintreten als hochwahrscheinlich anzusehen. Somit kann die gesamte kurz- und mittelfristige Planungsphase aus der weiteren Sensitivitätsanalyse ausgeschlossen werden.

Die Modifizierung aller Variablen ergab für den langfristigen Planungshorizont, dass die Lageparameter der beiden Weibullverteilungsfunktionen die größten Auswirkungen auf die prognostizierten absoluten Werte haben. Eine Senkung beziehungsweise Erhöhung dieser Variablen im vorgegebenen Rahmen überlagert in der Reaktion der absoluten Ausprägungen der jährlichen Altmodulströme nahezu vollkommen alle anderen variationsbedingten kontroversen Erscheinungen; hinsichtlich der Einflussnahme auf die Prognose im langfristigen Planungshorizont dominieren die beiden Lageparameter alle anderen Variablen. Der Fokus der nachfolgenden Untersuchung und Diskussion liegt dieserhalb auf diesen beiden Parametern, wenngleich eine Veränderung aller anderen Variablen eine verstärkende Wirkung zeitigen kann. Im Sinne der Greifbarkeit wird im Nachstehenden der Lageparameter der Weibullverteilung, der die technische Lebensdauer von vor dem Jahr 2013 installierten Modulen definiert, mit T_1 gekennzeichnet. Der Lageparameter der Weibullverteilung für Module, die seit 2013 installiert wurden und werden, erhält entsprechend die Kennzeichnung T_2. Die Indizierung der Formparameter *b*

beider Weibullverteilung erfolgt auf analoge Weise. Wie bereits mehrfach ausgeführt, resultiert das globale Maximum der Prognose aus dem verteilten Erreichen des technischen Lebensendes der Module, die zwischen 2009 und 2012 installiert wurden. Es ist daher evident, dass die Lage und die Ausprägung des globalen Maximums direkt von der Variation der Parameter der spezifischen Weibullverteilung abhängig sind. Eine Erhöhung des Lageparameters T_1 um ein Drittel (5 Jahre) auf den Wert 20 verschiebt den tatsächlich absolut auftretenden jährlichen Maximalwert von ursprünglich 2043 auf das Jahr 2048 – um die entsprechenden 5 Jahre. Das Modell zeigt sonach eine starke Abhängigkeit in der Langzeitplanungsphase von T_1. Die Erhöhung von T_1 auf den Wert 20 zeitigt aber noch eine weitere, nicht minder wichtige Auswirkung auf die prognostizierten Absolutwerte. Infolge der „Rechtsverschiebung“ des globalen Maximums auf dem Zeitstrahl der Prognose kommt es zu einer Überlagerung mit dem ursprünglich zwischen den Jahren 2063 und 2069 abgebildeten lokalen Maximum und dieserhalb zur Eliminierung des brisanten Minimums zwischen 2052 und 2061. Ein ähnliches Verhalten bezüglich jenes Minimums ergäbe sich aus der höchlich unwahrscheinlichen Reduktion von T_2. Wird zur Diskussion dieses Sachverhaltes die Abbildung 5-16 auf Seite 428 mit einbezogen, zeigt sich ein weiteres wichtiges Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und bestätigt die zuvor aufgestellte Behauptung: das prognostizierte Minimum zwischen den Jahren 2051 und 2061 ist ein Artefakt des Modells selbst. Dieses Minimum ergibt sich demnach direkt aus der Unterteilung der installierten Module in zwei, vom Installationszeitraum abhängige Gruppen. Bei einem sich in der Realität zutragendem fließenden Übergang bei der Technologieentwicklung (besonders hinsichtlich des neuralgischen Verhaltens und der installationszeitraumspezifischen Defektraten) wäre dieses Minimum nicht existent. Dies trifft jedoch nicht auf das ursprünglich zwischen den Jahren 2070 und 2083 gelegene lokale Minimum zu, welchem vom Standpunkt der Wirtschaftlichkeit aus daher eine gewichtigere Rolle zukommt. Die Variation aller Parameter, auch über die vorgegebenen Grenzen hinaus, effiziert indessen immer die Existenz des globalen Maximums. Dieses zeigt eine totale Abhängigkeit in der Lage von der Höhe des Parameters T_1. Der tatsächlich absolut auftretende jährliche Maximalwert verschiebt sich im selben Maß, wie die Änderung von T_1, bleibt jedoch in seinem absoluten Extremum nahezu unverändert. Es zeigt sich also ein erheblicher Forschungsbedarf in der Präzisierung des Parameters T_1, wie bereits für die kurz- und mittelfristige Planungsphase anempfohlen. Die Erhöhung des Parameters T_2 um ein Drittel auf einen Wert von 40 zeigt im Verhalten der restlichen Prognosewerte ein

ähnliches Bild wie die Variation des Parameters T_1 bezüglich des globalen Maximums und des artefakten Minimums. Es ist klar nachvollziehbar, dass eine Vergrößerung der Differenz zwischen T_1 und T_2 das artefakte Minimum in seiner Ausprägung erhöht. Gleichwohl zeigen alle nachgelagerten Extrema der ursprünglichen Prognose eine deutliche Abhängigkeit in der zeitlichen Lage von der gewählten Höhe des Parameters T_2: sofern keine Überlagerungseffekte die Extrema auslöschen, verschieben diese sich im selben Maße, wie die Differenz zum initialen Wert von T_2 beträgt. Dies ist insofern auch folgerichtig, als dass alle prognostizierten Altmodulströme ab 2060 auf der Weibull-verteilung, die die technische Lebensdauer von nach 2012 installierten Modulen definiert, basieren. Um verlässliche Aussagen über diesen Teil der Prognose geben zu können, ist ein deutlicher Erkenntnisgewinn zum Langzeitverhalten neuerer Modulkonzeptionen, wie bereits ebenfalls für die kurz- und mittelfristige Planungsphase anempfohlen, notwendig. In toto zeigt sich, dass der gesamte Langzeitplanungshorizont in der Ausprägung und der Lage der Extrema sowie in der gesamtheitlichen Darstellung sehr stark von der Höhe der gewählten Werte für T_1 und T_2 sowie von deren Differenz abhängt. Auch wenn sich die Unterteilung der Module in die beiden, vom Installationszeitraum abhängigen Gruppen anhand des Beispiels des artefakten Minimums in seiner scharfen Trennung als nachteilig erweist, wird dies hinwiederum langfristig der beschriebenen Technologieentwicklung (neuralgisches Verhalten, jährliche Defektraten et cetera) gerecht.

Nachdem das Eintreten der prognostizierten Altmodulströme für die kurz- und mittelfristige Planungsphase im Sinne dieser Arbeit und der zuvor geführten Diskussion als gegeben angesehen werden kann, zeigte sich eine starke Unsicherheit bezüglich der Ausprägungen im langfristigen Planungshorizont. Diese Unsicherheit ist deutlich auf die Wahl der Parameter T_1 und T_2 zurückzuführen. Die Variation jener kennzeichnenden Größen generiert demnach auch unterschiedlich starke Risiken für die Wirtschaftlichkeit etwaiger Recyclingprozesse für kristalline Siliziumsolarmodule in der langfristigen Planungsphase. Dieserhalb wird auf Basis der Erkenntnisse aus der bisherigen Diskussion um die Modifizierung der verschiedenen Einflussfaktoren und der jeweils daraus resultierenden Wirkung auf die zukünftigen absoluten annuellen Altmodulströme eine gezielte extreme Veränderung der Parameter vorgenommen, welche als Ergebnis durchaus wahrscheinliche Prognoseverläufe generiert – wenngleich mit völlig anderem Verlauf verglichen zur initialen Vorhersage. Neben der Begründbarkeit der jeweiligen

Parametervariation liegt der Fokus der Anpassung auf der Generierung von Alternativen, die das artefakte Minimum des Modells nicht enthalten. Im Sinne der Begründbarkeit wäre eine Reduktion von T_1 gänzlich und eine Reduktion von T_2 um ein Drittel nicht haltbar. Um das artefakte Minimum auszulöschen, bedarf es aber einer Annäherung beider Lageparameter in gewissen Grenzen inklusive einer Anpassung der jeweiligen Formparameter ob der resultierenden Wirkungsverstärkung. Im Zuge der ersten Variantenbildung wird unter Konstanz aller anderen Parameter T_1 um ein Drittel auf den Wert 20 angehoben und b_1 um ein Drittel auf den Wert 1,867 gesenkt. Die Folge ist eine Auslöschung des artefakten Minimums bei einer „Rechtsverschiebung“ des globalen Maximums. Ob der Anhebung von T_1 verkleinert sich die Differenz der Lageparameter beider Weibullverteilungen, ohne das eine Reduktion erfolgt. Für die Module, die bis zum Jahr 2012 installiert wurden, bedeutet das, dass die technische Lebensdauer von 63,5 % der annuell installierten Module um 5 Jahre trotz einer weiterhin frühzeitigeren jährlichen Absterbewahrscheinlichkeit angehoben wird. Die zweite Variantenbildung gestaltet sich hingegen etwas komplexer. T_1 wird wiederum auf den Wert 20 erhöht, T_2 hingegen um ein Sechstel auf 25 Jahre gesenkt. Die Reduktion von T_2 erfolgt dabei nicht im vollen Umfang der vorgegebenen Grenzen, da hinsichtlich der langfristigen Technologieentwicklung eine solches Verhalten als höchlich unwahrscheinlich anzusehen ist. Die Folge ist eine, verglichen zur ersten Variation, weitere Annäherung beider Lageparameter. Zudem werden beide Formparameter b_1 und b_2 um jeweils ein Drittel auf die Werte 3,733 respektive 5,33 erhöht. Hintergrund ist, dass durch die Erhöhung von b_1 ein verspäteter Anfall von Altmodulen, die vor 2013 installiert wurden, zugrunde liegt und sonach eine verstärkende Wirkung auf die Verringerung der Differenz beider Lageparameter erzielt wird; die Annäherung gestaltet sich stärker. Die diesem Sachverhalt kontrovers wirkende Erhöhung von b_2 ist der unwahrscheinlichen Reduktion von T_2 geschuldet und soll diesen Widerspruch abdämpfen. Beide Variationen sind in der Abbildung 5-17 auf der nachstehenden Seite gemeinsam mit der ursprünglichen Prognose ab Anbeginn des langfristigen Planungshorizontes zum Jahr 2028 dargestellt.

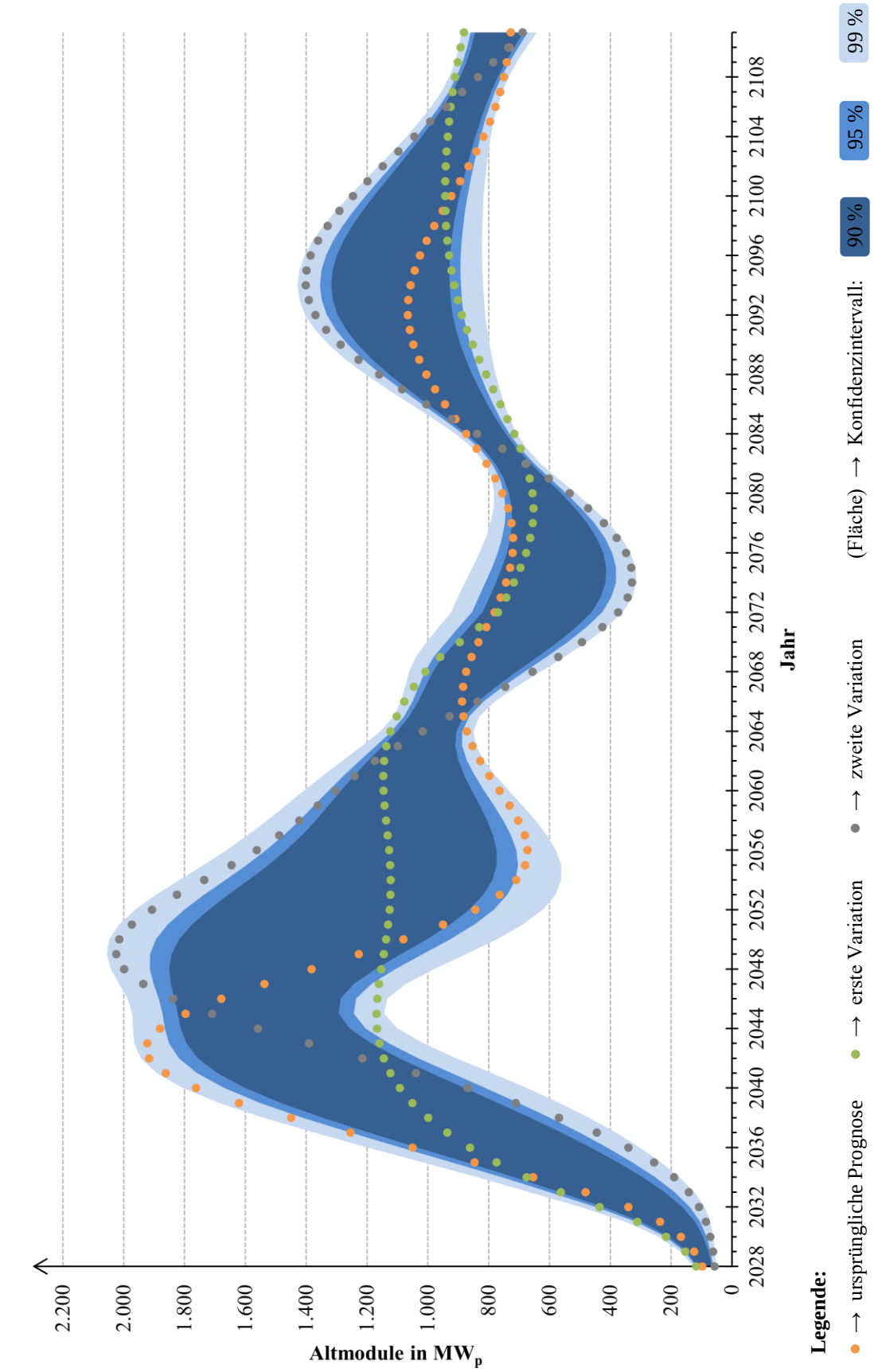


Abbildung 5-17: Darstellung der für Deutschland initial berechneten Prognose absoluter annueller Altmodulströme zusammen mit zwei Prognosevariationen infolge der Parametermodifikation und den daraus resultierenden Konfidenzintervallen für den langfristigen Planungshorizont ab dem Jahr 2028. Alle Einzelwerte sind im Anhang 5-2 hinterlegt.

Wie aus Abbildung 5-17 ersichtlich, weichen die beiden Prognosevariationen in ihrem Verlauf mitunter stark voneinander ab. So stellt sich das globale Maximum bei der ersten Variation (olivgrüne Kennzeichnung) als langgestreckte Quasiebene mit einer durchschnittlichen Ausprägung von etwas mehr als der Hälfte des absoluten Maximalwertes der initialen und der zweiten Variation (graue Kennzeichnung) dar; bei der zweiten Variation hingegen lediglich als „Rechtsverschiebung“ verglichen zur initialen Prognose in Höhe der Differenz beider zugehöriger Lageparameter. Weiter besitzen beide Prognosealternativen stark unterschiedliche Ausprägungen im jeweiligen lokalen Maximum nach dem Jahr 2084. Dementsprechend zeigen die zwei abgebildeten Variationen untereinander in ihrem Verlauf, ausgenommen der bedingten Absenz des artefakten Minimums, kaum Gemeinsamkeiten auf. Einzig das lokale Minimum zwischen 2070 und 2083, wenngleich in unterschiedlichen Ausprägungen, ist Bestandteil beider Variationen und bot sich zudem bereits bei der ursprünglichen Prognose (orange Kennzeichnung) dar. Dieser für ein Recycling unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten brisante Bereich lässt sich bei allen drei Fällen in letzter Konsequenz auf das niedrige Niveau jährlicher realer Neuinstallationen (inklusive Schatteninstallationen) zwischen den Jahren 2024 bis 2030 (bei der ursprünglichen Prognose und der ersten Variation) sowie zwischen 2024 und 2035 im Falle der zweiten Variation zurückführen. Mit dem jeweiligen Ansteigen der Schatteninstallationen im Anschluss an die eben beschriebene Phase niedriger realer Neuinstallationen (initiale Berechnung ab 2032, erste Variation ab 2031 sowie zweite Variation ab 2037) und dem allgemachen Erreichen der technischen Lebensdauer jener schatteninstallierten Module wird das lokale Minimum in allen drei Fällen durchbrochen; die jährlichen absoluten Altmodulströme steigen wieder an. Sonach stellt dieses lokale Minimum kein Artefakt des Modells dar, sondern ist das Ergebnis der zukünftigen geringen realen Neuinstallationen. Wenngleich die absolute Ausprägung dieses lokalen Extrempunktes bei allen drei Prognoseverläufen variiert, ist die Existenz sowie die zeitliche Lage im Sinne des Modells und der getroffenen Annahmen zu den annuellen technologiebereinigten Neuinstallationen als hochwahrscheinlich anzunehmen.

Ob der gezielten Parametermodifikation am Rand der Modellgrenzen stellen beide beschriebenen Prognosealternativen Extremverläufe unter Absenz des artefakten Minimums zwischen den Jahren 2052 und 2061 dar. Dieserhalb spannen sie zusammen mit der ursprünglichen Berechnung den voraussichtlichen Fächer wahrscheinlicher Prognoseverläufe auf. Mithilfe der Bildung von Konfidenzintervallen lässt sich sonach

die gesamte plausible Bandbreite möglicher annueller Prognosewerte, weil nur auf Parameteranpassungen im Rahmen begründbarer Annahmen beruhend, abdecken. Die Unter- und Oberkanten der jeweiligen Konfidenzintervalle können dabei nicht als absolute Schranken im Sinne einer Szenarienbildung dienen, sie grenzen indessen den auf Basis des Modells voraussichtlichen Raum ein; das spezifische Konfidenzintervall überlagert die anzunehmenden absoluten Prognosewerte eines zu betrachteten Zeitraumes mit der jeweiligen gegebenen Wahrscheinlichkeit. Eine Diskussion mittels Konfidenzintervallen erweist sich zudem als vorteilhaft, da die starken Ausprägungen der Extrema und die Wirkung von artefakten Erscheinungen auf den prognostizierten Verlauf gedämpft werden. Wie bereits angedeutet, ist infolge der Diskussion mittels Konfidenzintervallen keine Szenarienbildung im eigentlichen Sinne möglich. Vielmehr können mithilfe der im Anhang 5-2 aufgeführten absoluten Einzelwerte aller spezifischen Intervallgrenzen sowohl für einzelne Jahre als auch für Zeitreihenabschnitte im Sinne des Modells zu erwartende Bereiche annueller Altmodulströme angegeben werden. Diese können wiederum, je nach Logik und zugrunde liegender Annahmen, weiter verschlankt beziehungsweise extendiert werden, sowie sich in ihrer tendenziellen Ausprägung begründet in Richtung der entsprechenden Intervallgrenzen verschieben. Beispielshalber ist für das lokale Minimum zwischen den Jahren 2070 und 2083 davon auszugehen, dass sich der real eintretenden Altmodulstrom eher am oberen Bereich der Konfidenzintervalle zuträgt – mindestens jedoch die untere Grenze des 90 % Konfidenzintervalls erreicht. Dies begründet sich darin, dass die zweite Prognosevariation infolge deren extremen Verlaufs in diesem Bereich das 99 % Konfidenzintervall nach unten hin abgrenzt. Diese Variation gestaltet sich aber mit fortschreitendem Prognosezeitraum in ihrer Wahrscheinlichkeit als abnehmend weil mit einer Verringerung der technischen Lebensdauer der Module, die nach 2013 installiert wurden, einhergehend. Demgegenüber zeigen sowohl die initiale Prognose als auch die erste Variation trotz unterschiedlicher Parameterwerte in diesem Bereich gute Übereinstimmungen und kommen zudem ohne jene Verringerung der technischen Lebensdauer aus. Im Sinne des Modells und der gewählten Betrachtungsweise ist daher exemplarisch für das Jahr 2078 ein Altmodulaufkommen zwischen 476,18 MW_p und 793,49 MW_p[141] als wahrscheinlich anzunehmen, wobei sich eine starke Tendenz in Richtung 600 MW_p und höher (liegt nahe der tatsächlichen Prognosewerte der initialen Berechnung und der ersten Variation) andeutet.

[141] Die Werte sind dem Anhang 5.2 für das Jahr 2078 direkt zu entnehmen.

5.2.2.4 Regionale Betrachtungen

Da der regionale Markt jährlicher Neuinstallationen beispielshalber für Sachsen samt deutschseitiger Anrainer an den nationalen Markt und dessen Rahmenbedingungen gekoppelt ist, ist auch auf dieser Ebene vom Stagnieren auf dem derzeitigen Niveau auszugehen. Indes sind auch weiterhin einzelne, nicht vorhersehbare und sprunghafte Installationen regional möglich. Speziell für Sachsen gehen die Prädiktionen aber in toto von einem sinkenden Markt ob der Fokussierung auf Braunkohle aus. Wie die regionalen Betrachtungen (Kapitel 4.2.4) gezeigt haben, tragen die Installationen der polnischen und tschechischen Anrainer nur mit vernachlässigbar kleinen Werten zum hiesigen Anlagenbestand bei. Sowohl in Polen als auch in Tschechien (mit Erreichen des im NREAP definierten Ausbauziels) ist nicht mit einem Marktwachstum zu rechnen. Bei der Diskussion stellte sich weiter heraus, dass der gesamte Anlagenpark von beispielshalber Sachsen samt seiner deutschseitigen Anrainer Ende 2013 aus 573.657 Einzelanlagen besteht, deren Gros nach 2009 installiert wurde.

Die Wahl der regionalen Grenzen erfolgt in diesem Kapitel exemplarisch für Sachsens samt deutschseitiger Anrainer (inklusive Berlin), dem ostdeutschen PV-Produktionscluster und schließlich im Rahmen der Kleinregion Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen. Dies soll einen ersten Eindruck der sich aus einer regionalen Eingrenzung ergebenden Dimensionen möglicher annueller Altmodulströme liefern. Anschließend werden zwei Prognosen auf gleicher räumlicher Ebene gegenübergestellt. Ziel ist eine vergleichende Betrachtung regionalspezifischer Ergebnisse, was letztlich für eine etwaige Standortwahl eines potenziellen Altmodulrecyclers essenziellen Charakter besitzt. Zur Prognose aller regionalen oder örtlich eingegrenzten Altmodulströme findet immer das zuvor ausführlich diskutierte Modell analog Anwendung, da es bei der Verwendung regionaler Installationszahlen Altmodulströme in den entsprechend festgelegten Grenzen als Output generiert. Bei einer örtlichen Eingrenzung der Betrachtung im Sinne der Prognose jährlicher Altmodulströme sind sonach die historischen, gegenwärtigen und zukünftigen technologiebereinigten Neuinstallationen im gleichen Maße zu limitieren. Weil die räumlich beschränkten absoluten Neuinstallationen einen Bestandteil des nationalen Marktes darstellen, müssen diese für jeden beliebigen Zeitpunkt oder Zeitabschnitt zwingend unterhalb, maximal jedoch auf gleichem Niveau mit den nationalen Installationszahlen für den entsprechenden Bezugszeitraum liegen. Die Abweichung variiert dabei mit der spezifischen Wahl der örtlichen Betrachtungs-

grenzen. Gleiches gilt für die produktionsbedingten Zuschüsse zum Gesamtabfallstrom. Diese sind direkt vom Standort der Modulhersteller abhängig und müssen bei einer regionalen Fokussierung ebenfalls den gewählten Grenzen adäquat angepasst werden. Mit der modellbedingten Verwendung jener reduzierten technologiebereinigten annuellen und für die Wahl der örtlichen Grenzen charakteristischen Neuinstallationen als Input führt eine regionale Limitierung der Prognose folglich zur Verringerung der zugehörigen annuellen Altmodulströme. Je nach regionalspezifischer Installationshistorie kann dieserhalb ein wirtschaftliches Recycling unterschiedlichen Risiken unterliegen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der zeitlichen Lage und der Ausprägung eines lokalen Minimums nach der Prozessinitiierung sowie auf dem Zeitpunkt, der eine Prozessinitiierung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten determiniert. Gleichwohl spielen in diesem Zusammenhang Transportkosten keine minder wichtige Rolle, welche zusätzlich zur regionalen Installationshistorie einen weiteren Untersuchungsgegenstand bedingen: die regionalspezifische Installationsdichte, welche letztlich das benötigte Einzugsgebiet an Altmodulen mit definiert.

Für die Prognose innerhalb der jeweils vorgegeben örtlich Grenzen werden in diesem Kapitel keine weiterführenden Informationen zur Berechnungsmethodik angegeben, es werden lediglich die angepassten Inputdaten der regionalspezifischen jährlichen Neuinstallationen und die dafür notwendigen Annahmen, die einbezogenen Produzentenstandorte sowie die erzielten Ergebnisse präsentiert und diskutiert.

Die Beispielregionen, welche zur Darstellung der sich aus der örtlichen Eingrenzung ergebenden Dimensionen annueller Stoffstromprognosen kristalliner Siliziumsolaraltmodule Anwendung finden sollen, gebieten jedoch unterschiedliche Spezifika. Gleichwohl sind in Abhängigkeit der jeweiligen Datenverfügbarkeit weitere Annahmen pro Exempel zu treffen. Die nachstehende Liste führt deshalb die zur Berechnung notwendigen zusätzlichen Bedingungen für die einzelnen Betrachtungsgegenstände kompakt zusammen.

- Sachsen samt deutschseitiger Anrainer: Dieses definierte Gebiet, angelehnt an die Untersuchungen des Kapitels 4.2.4, umfasst die Bundesländer Sachsen, Bayern, Thüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Berlin. Die Daten der Installationshistorie für den Zeitraum von 2002 bis 2015 aller einzelnen Bundesländer entstammen gänzlich [AEE 2016], wobei die Umrechnung auf technologiebereinigte jährliche Neuinstallationen analog der Prognose für Gesamtdeutschland erfolgt.

Die historischen Neuinstallationen zwischen 1990 und 2001 werden anhand der für diesen Zeitraum und jener regionalen Eingrenzung gegebenen 59 MW_p [AEE 2016] Gesamtinstallationen (entsprechen technologiebereinigten 53,1 MW_p) so geschätzt, dass sich die resultierenden jährlichen Neuinstallationen am für diesen Zeitraum bekannten gesamtdeutschen Trend orientieren. Für die Periode nach dem Jahr 2015 sind die jährlichen Neuinstallationen anhand des durchschnittlichen Anteils (48 %) der untersuchten Region an den technologiebereinigten jährlichen Neuinstallationen von Deutschland evalviert. Alle annuellen gebietsspezifischen Neuinstallationen sowie die sich aus dem Modell ergebenden Prognosewerte und die Ausprägungen der zugehörigen Konfidenzintervalle finden sich im Anhang 5-3. Der Anteil an Produktionsabfällen wird nach Tabelle 4-32, Kapitel 4.7, Seite 312 auf jährlich 12,7875 MW_p (Kennungen M1 bis M14) entsprechend der im betrachteten Gebiet gelegenen Produzentenstandorte geschätzt.

- Ostdeutsches PV-Produktionscluster: Basis bilden alle in Abbildung 4-51, Kapitel 4.7, Seite 314 lokalisierten Modulproduzenten, welche keine schraffierte Füllung aufweisen. Der Betrachtungsraum ist dabei nicht durch die betreffenden Bundeslandsgrenzen determiniert. Zur Abgrenzung des zu untersuchenden Gebietes wird indessen die tatsächliche lokale Lage der jeweiligen clusterinternen Modulproduzenten zugrunde gelegt. Diese dienen als Eckpunkte und spannen sonach den betrachtungsrelevanten Raum auf. Die zugehörigen Daten sind auf Postleitzahlenebene erhoben und entstammen [Proteus Solutions GbR 2016]. Folgende Postleitzahlengebiete definieren diese Beispielregion.

Tabelle 5-7: Zur Prognose der jährlichen Altmodulströme in der Beispielregion des ostdeutschen PV Produktionsclusters verwendete Postleitzahlengebiete.

Postleitzahlengebiete						
01	02	03	04	07	08	09
10	12	13	15	162	163	165
167	17258	17268	17279	17291	17328	99

Die Umrechnung der jeweiligen Installationshistorie zwischen 2009 und 2015 auf technologiebereinigte Werte erfolgt in komparabler Weise zum zuvor genannten Beispiel. Aufgrund eines erheblichen Defizits bei der Datenverfügbarkeit[142] wird die Installationshistorie für den Zeitraum vor 2009 im Untersuchungsgebiet

[142] Zur Berechnung benötigte qualitativ adäquate Datensätze der Installationshistorie auf regionaler Ebene existieren nur für den Zeitraum ab 2009. Grund ist die zu diesem Zeitpunkt eingeführte Meldepflicht des EEG für neuinstallierte PV-Anlagen.

wiederum mit dem sich aufzeigenden Trend der gesamtdeutschen Installationshistorie synchronisiert. Der durchschnittliche Anteil der technologiebereinigten jährlichen Neuinstallation in den definierten Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters an den gesamtdeutschen Neuinstallationen für den bekannten Zeitraum zwischen 2009 und 2015 beträgt circa 7,7 %. Dieser Anteil wird mit dem jeweiligen nationalen Jahreszubau multiplikativ verknüpft. Da etwaige desultorische Abweichungen zwischen nationaler und regionaler Installationshistorie sowohl einen positiven als auch einen negativen Betrag aufweisen können, wird unterstellt, dass diese sich auch infolge der niedrigen absoluten Ausprägungen gegenseitig auslöschen, beziehungsweise sich gesamtheitlich als vernachlässigbar klein darstellen. Die selbe Annahme wird ingleichen für den Zeitraum der zukünftigen Neuinstallationen supponiert. Der Anteil an Produktionsabfällen orientiert sich an Tabelle 4-33, Kapitel 4.7, Seite 317 und beträgt sonach 12,5875 MW_p (Kennungen M1 bis M13). Alle sich ergebenden jährlichen Neuinstallationen für dieses Untersuchungsgebiet sowie die berechneten Prognosewerte und die Ausprägungen der zugehörigen Konfidenzintervalle finden sich im Anhang 5-3.

- Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen: Grundlage stellen die drei aufgeführten Städte Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen dar. Diese spannen den betrachtungsrelevanten Raum auf. Das zwischeninne liegende Gefilde samt Städten wie beispielshalber Markranstädt, Schkeuditz und Delitzsch wird dieser Beispielregion mit zugerechnet. Die Datenerhebung der jährlichen Neuinstallationen für den Zeitraum zwischen 2009 und 2015 sowie deren Umrechnung auf technologiebereinigte Werte erfolgt analog der vorangegangenen Beispielregion auf Postleitzahlenebene und umfasst die in nachstehender Tabelle 5-8 aufgeführten Gebiete. Die Daten entstammen wieder [Proteus Solutions GbR 2016].

Tabelle 5-8: Zur Prognose der jährlichen Altmodulströme in der Beispielregion des Raumes Leipzig, Halle (Saale), Bitterfeld-Wolfen verwendete Postleitzahlengebiete.

Postleitzahlengebiete								
041	042	043	044	04509	04519	061	0621	0623
0624	0625	0674	0676	0677	06780	0679	0680	

Für den Zeitraum vor 2009 ist bereits aus Kapitel 4.2.4 bekannt, dass circa 90 % der Gesamtinstallationen bis 2013 auf die Zeit nach 2008 zurückgehen. Wird die betrachtete Fläche mit den Flächen der zugrunde liegenden Bundesländer verglichen, ergibt sich daraus für diese Beispielregion eine hochwahrscheinliche Gesamtinstallation von rund 15 MW_p vor dem Jahr 2009. Diese werden über den Zeitraum zwischen 1990 und 2008, angelehnt an den nationalen Trend der jährlichen Neuinstallationen sowie den Trends der Bundesländer Sachsen und Sachsen-Anhalt für selbige Phase, präterpropter verteilt. Die auf diese Weise geschätzten Neuinstallationen betragen in Summe für die Jahre 1990 bis einschließlich 2008 jene 15 MW_p. Zudem bilden ihre Einzelausprägungen durchweg gute Übereinstimmungen mit dem durchschnittlichen Anteil annueller Neuinstallationen dieser Beispielregion an der bekannten nationalen Installationshistorie. Wenngleich für die zukünftigen annuellen Zubauraten kristalliner Siliziumsolarmodule eine Korrelation im Verhalten mit dem gesamtdeutschen Markt unterstellt wird, wiegen etwaige sprunghafte und imponderable zukünftige Neuinstallationen mit kleiner werdenden Betrachtungsgrenzen immer schwerer; je regionaler sich die Betrachtung darstellt, desto ungenauer ist die zugehörige Schätzung der zukünftigen Entwicklung. Deshalb stellt dich die Vorgehensweise zur Festlegung der jährlichen zukünftigen Neuinstallationen wie folgt dar. Der letzte bekannte Wert aus dem Jahr 2015 (6,3 MW_p technologiebereinigt / 7,26 MW_p nicht technologiebereinigt) wird entsprechend der nationalen Vorgaben geringfügig auf 7 MW_p jährliche technologieübergreifende Gesamtneuinstallationen als Basiswert für alle Prädiktionen innerhalb der Beispielregion gesenkt. Dieser wird analog der gesamtdeutschen Vorhersage mit den in Kapitel 4.3 herausgearbeiteten Technologieanteilen multipliziert. Mit dem supponierten Erreichen der nationalen 52 GW_p-Marke im Jahr 2024 wird der weitere Entwicklungstrend an die zuvor beschriebene Beispielregion des ostdeutschen PV-Produktionscluster gekoppelt. Der regionalspezifische Anteil der Neuinstallationen liegt dabei bei rund 6 %. Alle annuellen gebietsspezifischen Neuinstallationen sowie die sich aus dem Modell ergebenden Prognosewerte und die Ausprägungen der zugehörigen Konfidenzintervalle finden sich im Anhang 5-3. Nach Abbildung 4-51, Kapitel 4.7, Seite 314 existieren keine Produktionsstandorte kristalliner Siliziumsolarmodulhersteller im untersuchten Gebiet, weshalb keine Produktionsausschüsse zu den annuellen Altmodulprognosewerten hinzukommen.

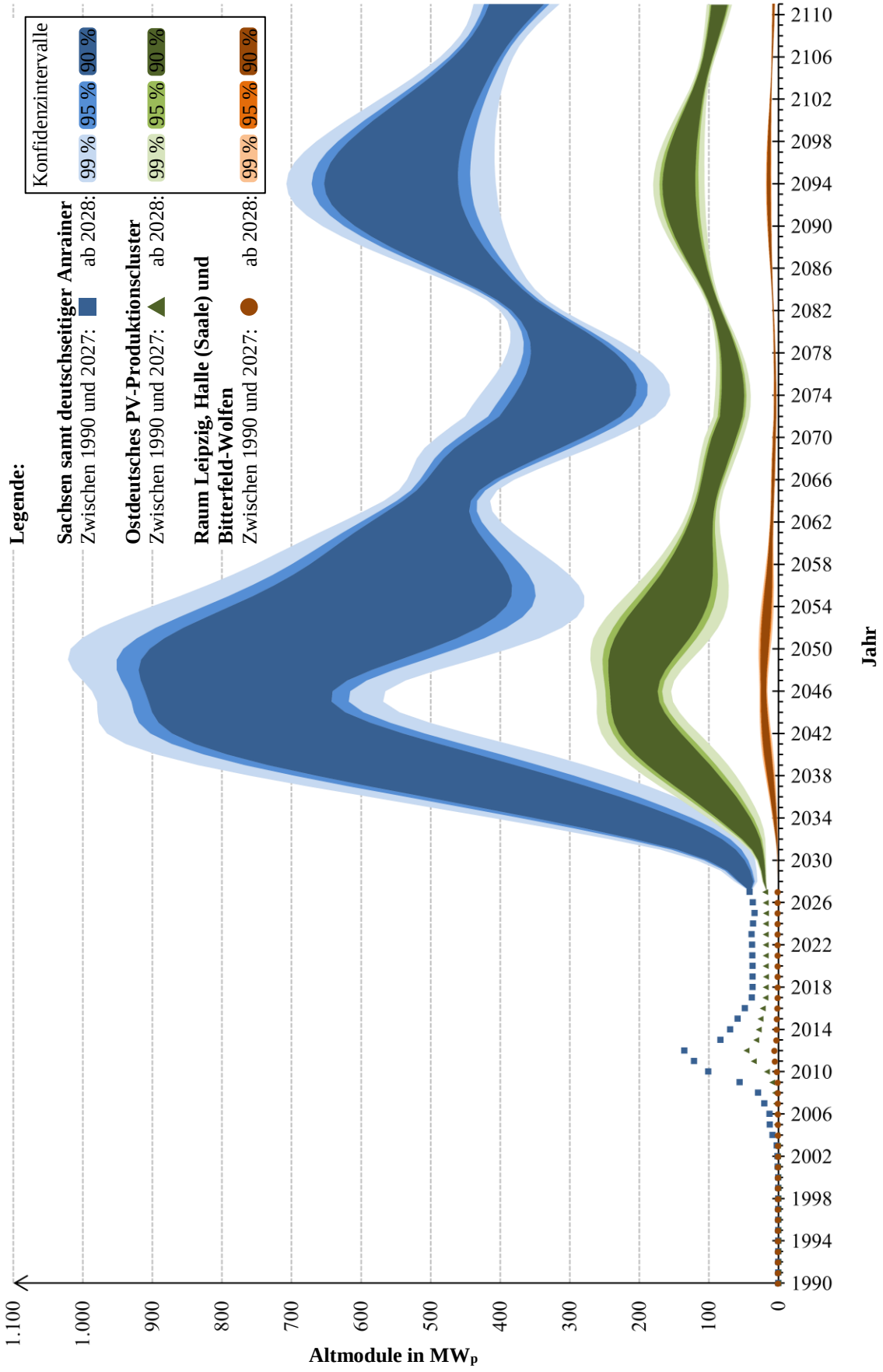


Abbildung 5-18: Prognose jährlicher Altmodulströme für die drei Beispielregionen Sachsen samt deutschseitiger Anrainer; ostdeutsches PV-Produktionscluster sowie den Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen.

Die Abbildung 5-18 fasst die Ergebnisse aller drei regionalen Berechnungen zusammen und zeig die gebietsspezifischen Altmodulprognosen sowohl für die historischen Altmodulströme als auch für die kurz- und mittelfristige Planungsphase mittels Punktwerten sowie für die Langzeitplanungsphase in Form von Konfidenzintervallen. Zudem finden sich im Anhang 5-3 gesamtheitlich alle Einzelwerte der dargestellten Prognosen (inklusive der Konfidenzintervalle) und der zugrunde liegenden gebietsspezifischen jährlichen Neuinstallationen in tabellarischer Form. Der Vergleich der drei Prognosen zeigt deutlich die sich aus dem Grad der Regionalisierung ergebenden unterschiedlichen Dimensionen des annuellen Altmodulaufkommens. Zur Sicherung der Wirtschaftlichkeit potenzieller Recyclingaktivitäten können sonach mittels des Prognosemodells in Abhängigkeit des benötigten Mindestniveaus an jährlichen Altmodulen und einem bereits determinierten Standort entweder das obligate Einzugsgebiet skaliert, der entsprechende Zeitpunkt zur Prozessinitiierung bestimmt sowie etwaige zukünftige Risiken identifiziert werden. Bei einer gegebenen maximalen Entfernungsmatrix kann das verwendete Berechnungsmodell darüber hinaus zur optimalen Standortwahl beitragen, da es auch Vergleiche auf analoger regionaler Ebene oder auf Basis ähnlicher Entfernungsmatrizen zulässt. Um dies zu verdeutlichen, sind in der Abbildung 5-19 auf der nachfolgenden Seite die Altmodulprognosen für Sachsen und Thüringen exemplarisch kontrastiert. Die Wahl dieses Exempels auf Bundeslandebene und nicht für zwei vergleichbare Ballungszentren ist in diesem Zusammenhang deshalb sinnvoll, da die Datengüte und die Datenquantität bezüglich des benötigten Modellinputs (historische jährliche Neuinstallationen sowie die Abschätzung der zukünftigen Marktentwicklung) eine breitere Basis besitzt sowie qualitative Vorzüge aufweist. Dies lässt in der Konsequenz auch genauere Prognosen zu – zumindest zum jetzigen Wissensstand.

Die benötigten Inputdaten zur Berechnung der Altmodulprognosen für Sachsen und Thüringen entstammen [Proteus Solutions GbR 2016] sowie speziell für Sachsen im Zeitraum 1992 bis 1994 [Rindelhardt *et al.* 1995]. Alle berechneten Einzelwerte der jeweiligen Punktwerte als auch der entsprechenden Konfidenzintervalle sowie die zugrunde gelegten jährlichen technologiebereinigten Neuinstallationen finden sich im Anhang 5-4 in akkumulierter tabellarischer Form. Der Anteil der annuellen Produktionsausschüsse am gebietsspezifischen Altmodulstrom ist laut Tabelle 4-33, Kapitel 4.7, Seite 317 für Sachsen (Kennung M1, M5, M6, M7, M10 und M11) mit 7,4575 MW_p und für Thüringen (Kennung M4, M8, M9 und M12) mit 2,43 MW_p veranschlagt.

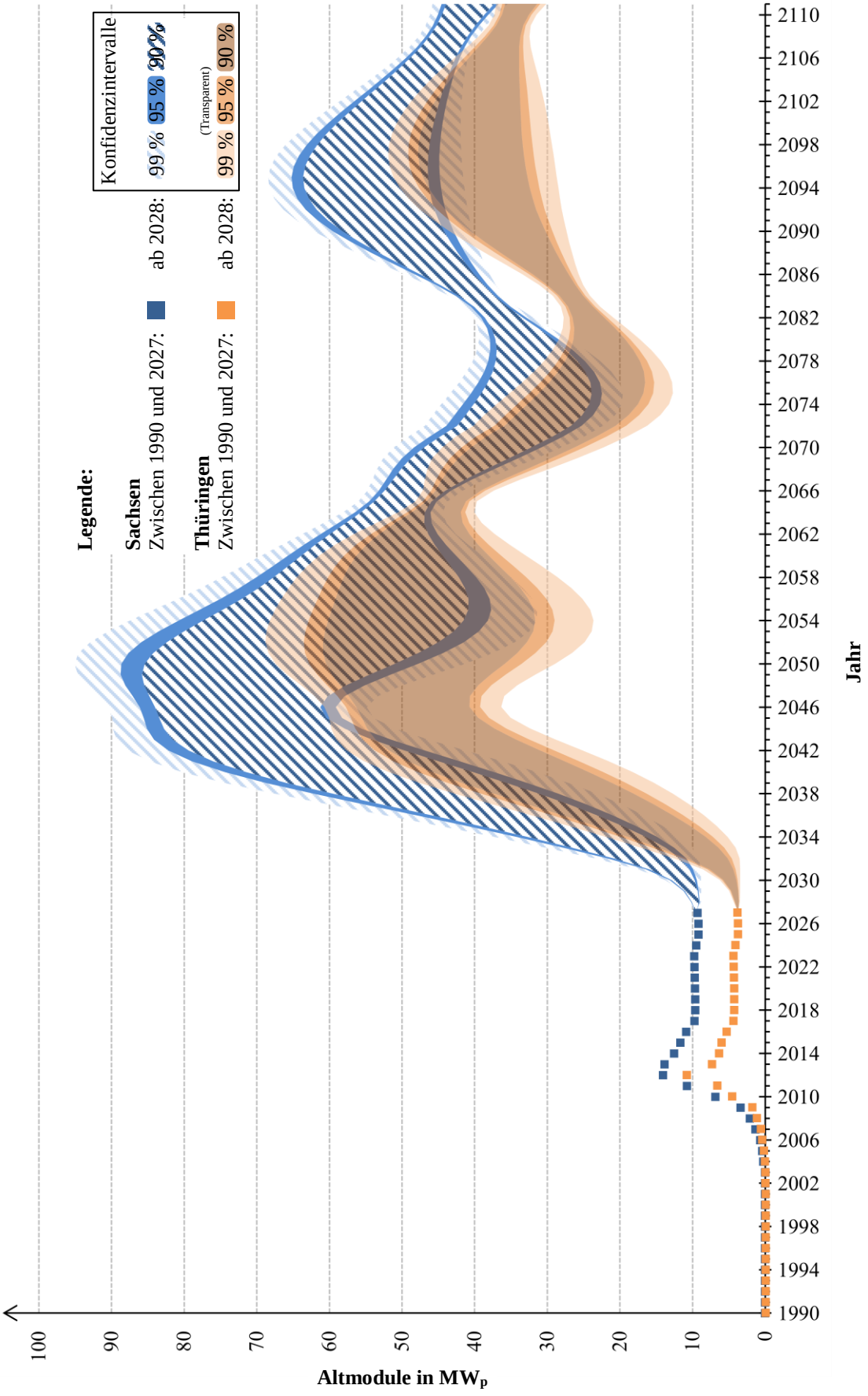


Abbildung 5-19: Prognose jährlicher Altmodulströme für die Bundesländer Sachsen und Thüringen. Einzeldaten in Anhang 5-4.

Wenngleich es sich bei den beiden gewählten Beispielen um willkürliche regionale Eingrenzungen handelt und die Definition eines möglichen Einzugsgebietes anhand der Grenzen einzelner Bundesländer im wissenschaftlichen Sinn nicht begründbar ist, eignet sich die Kontrastierung beider Exempel zur Veranschaulichung der Auswirkung einer unterschiedlichen regionalen Installationshistorie auf die Ausprägung jährlicher zur Verfügung stehender Altmodulströme, der Abschätzung eines möglichen Zeitpunktes zur Initiierung eines Recyclingprozesses sowie zur Evaluierung möglicher zukünftiger Risiken infolge der Standortwahl mit definiertem Einzugsgebiet. Für ein beispielhaft gegebenes Mindestniveau von 30 MW_p jährlich zur Verfügung stehender Altmodule sind der Abbildung 5-19 zusammen mit den im Anhang 5-4 aufgeführten Einzelwerten folgende Aussagen zu entnehmen:

- Das Erreichen des Schwellenwertes von 30 MW_p als benötigte jährliche Mindestmenge ist in beiden Regionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten als hochwahrscheinlich anzusehen. Während in Sachsen die untere Kante des 99 % Konfidenzintervalls im Jahr 2040 die gegebene Schwelle durchbricht, verschiebt sich dieser Zeitpunkt in Thüringen auf das Jahr 2044; eine Prozessinitiierung mit einem vergleichbaren Risiko könnte in Sachsen vier Jahre zuvor erfolgen.
- Im weiteren Verlauf der Recyclingtätigkeit würde sich bei dem Beispiel des „sächsischen Einzugsgebietes“ lediglich im Zeitraum zwischen den Jahren 2071 und 2080 ein mittleres unternehmerisches Risiko infolge der Unterschreitung der benötigten Mindestmenge ergeben. Wie sich jedoch bereits bei der Sensitivitätsanalyse herausgestellt hat, ist vielmehr davon auszugehen, dass sich der zu erwartende Altmodulstrom für diesen Zeitraum eher am oberen Bereich des zugehörigen 90 % Konfidenzintervalls zuträgt. Im Gegensatz dazu erscheint im Falle von Thüringen ein tatsächliches Unterschreiten des Schwellenwertes ab dem Jahr 2069 bis zum Jahr 2092 als hochwahrscheinlich – zwischen 2079 und 2084 jedoch als gegeben. Ein Recyclingprozess gleicher Skalierung würde in den Grenzen von Thüringen sonach wesentlich höheren unternehmerischen Risiken unterliegen.
- Aufgrund der abweichenden Installationshistorie in beiden Beispielregionen ist eine unterschiedliche Skalierung bei gleichen Risiken möglich. Sollte beispielshalber eine Unterschreitung der Mindestmenge nahezu ausgeschlossen sein, ist im „sächsischen Einzugsgebiet“ eine Schwellenwert von knapp 22 MW_p nicht zu überschreiten; im Falle von Thüringen maximal rund 15 MW_p. Ist indessen davon

auszugehen, dass etwaige Versorgungsengpässe mittels zuvor stark erhöhten jährlichen Altmodulströmen überbrückt werden können, kann für den jeweiligen brisanten Zeitraum die lokale obere Grenze des 90 % Konfidenzintervalls zugrunde gelegt werden. Daraus ergäbe sich für das „sächsische Einzugsgebiet“ eine maximale Skalierbarkeit von knapp 37 MW_p respektive 26 MW_p für Thüringen.

Wie bereits aufgeführt, kann das Prognosemodell für beliebige regionale Eingrenzungen adäquate Ergebnisse und diskutable Erkenntnisse liefern, deren Güte letztlich jedoch stark von der entsprechenden Verfügbarkeit und Qualität der benötigten Daten abhängt. Es zeigt sich eine Korrelation dieser Kriterien mit dem Grad der Regionalisierung, wobei mit zunehmender regionaler Einschränkung eine qualitative und quantitative Verschlechterung der Datenbasis einhergeht. Dies betrifft neben der regionalen Installationshistorie die Imponderabilität der zukünftigen regionalen Neuinstallationen in gleichem Maße. Besonders bei stark beschränkten örtlichen Eingrenzungen zeigen sprunghafte Neuinstallationen eminente Auswirkungen auf die entsprechende Prognose. Mit steigender Regionalisierung der Betrachtungsebene wächst die Imponderabilität dabei nicht nur hinsichtlich der jährlichen Zubauraten, sie gipfelt viel mehr in der Frage nach deren regionalen Verteilung: der Installationsdichte, welche wiederum das benötigte Einzugsgebiet eines etwaigen Recyclingprozesses definiert. Indessen steigt mit fortschreitender Kenntnis der tatsächlich (vom jetzigen Zeitpunkt aus zukünftigen) eintretenden Neuinstallationen der direkt nachfolgenden Jahre analog die Güte der Prognose.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass die bereits im Kapitel 5.2.2.2: „Absolute Betrachtungen“ vorgeschlagene Unterteilung in zwei Planungsphasen als auch die jeweils aufgeführten Handlungsempfehlungen aus Sicht des Autors essenziellen Charakter besitzen. Ein weiterer zentraler Punkt und damit eine klare Abgrenzung zu nahezu allen anderen angegebenen Studien ist die Erkenntnis, dass unabhängig des Grades der Regionalisierung sowie einer möglichen Änderung der Parameter in den Grenzen des Modells infolge etwaiger weiterer Forschungsergebnisse ein Eintreten erhöhter Altmodulströme vor dem Jahr 2026 faktisch auszuschließen ist. Ein Anstieg der jährlichen Neuinstallationen würde zwar die absoluten Ausprägungen erhöhen, nicht jedoch den Zeitpunkt des Einsetzens der Massenströme, da sich diese aus den historischen Installationszahlen ableiten (vgl. Kapitel 5.2.2.3).

5.2.2.5 Weitere Empfehlungen und Effekte eines Bestands- respektive Recyclingpotenzialkataster

Mit Fokus auf Sachsen zeigte sich im Kapitel 4.2.4, dass es im Laufe der letzten 20 Jahre zu einer Verschiebung der Neuinstallationen hin in die ländlichen Gegenden kam und der Direktionsbezirk Leipzig über die höchste Anlagendichte im sächsischen Raum verfügt. Die Betrachtung der regionalen Entwicklungen sowie die vorangegangene Prognose der jährlichen Altmodulströme machte deutlich, dass ein Anlagenbestandskataster oder eine erweiterte Datenakquise im Zuge der Meldepflicht für Neuanlagen sich auf vielen Ebenen positiv auswirken würden. Neben einer genaueren Lokalisierung der Anlagen (würde eine weitere Regionalisierung des Prognosemodells zulassen) wäre auch eine anlagenspezifische Zuordnung des jeweiligen Alters ein Vorteil. Dies hätte positive Auswirkungen auf die gesamte Rückführungslogistik und die bereits diskutierte Qualität etwaiger Altmodulprognosen. Wesentlich gewichtiger stellt sich jedoch eine Ausweitung der Anlageninformation (sowohl in Form eines Bestandskatasters als auch in der jetzigen Art und Weise) auf die installierte Zellen- und Modultechnologie dar. Dieser additionale Informationslayer bezüglich der installierten Technologien würde die Güte der Prognosemodelle steigern, indem sich die Schätzung der Verteilungsschlüssel installierter Technologien (kristalline Siliziumzellen, CdTe-Zellen et cetera) als obsolet erweisen würde und sich der aus der Schätzung ergebenden Fehlerbereich sonach absentiert. Gleichwohl wären bessere Rückschlüsse alterungsbedingter Defekte auf die jeweilige PV-Technologie möglich. Eine technologiespezifische Kennzeichnung der Module selbst hätte den Vorteil, dass die jeweiligen Modultypen schon während der Sammlung getrennt gehalten und somit den entsprechenden Recyclingprozessen ohne eine zusätzliche Sortierung (Zwischenstufe) zugeführt werden könnten. Zudem wäre eine Zuordnung des Herkunftslandes der installierten Module als Datenbasis für statistische Untersuchungen zur technischen Lebensdauer sinnvoll. Diese Zusammenhänge würden sich dann direkt aus der Praxis und nicht aus labortechnischen Untersuchungen ergeben. Der Konnex zwischen Herkunftsland und neuralgischen Verhalten sowie zu erwartender technischer Lebensdauer hätte ebenfalls positiven Einfluss auf die Genauigkeit von Prognosen zu Altmodulströmen (vgl. Kapitel 5.2.1.2 auf Seite 399). Weiter würde sich die Möglichkeit ergeben, den Anteil verschiedener Produktionsstandorte am regionalen Anlagenbestand statistisch zu erfassen.

Zusammenfassend werden die folgenden beiden Maßnahmen aus Sicht des Autors als zielführend angesehen:

- additionaler Informationslayer bezüglich der installierten Photovoltaiktechnologie einhergehend mit der Meldepflicht für Neuanlagen,
- eine Kennzeichnung der Module mit Technologietyp und Herkunftsland.

Darüber hinaus würde sich aus der Kenntnis der am jeweiligen Anlagenstandort installierten Technologie, dem Anlagenalter und der Information über den genauen Anlagenstandort selbst die Möglichkeit zur Generierung eines Anlagenbestandskatasters ergeben. Wenngleich diese Informationen nur den Akteuren der entsprechenden Abfallwirtschaft zugänglich gemacht werden dürften, birgt diese Bündelung auch Gefahren[143]. Ein Anlagenbestandskataster, beispielshalber untersetzt mit geographischen Informationssystemen, welches die genannten Informationen (genauer Anlagenstandort, Installationszeitpunkt und installierte Technologie) beinhaltet, kommt einem Recycling-potenzialkataster für photovoltaische Module gleich. Am Beispiel der Stadt Leipzig könnte sonach das bestehende Solardachkataster[144] um (neu)installierte Anlagen ergänzt werden; mit definierten Zugriffsrechten nur für die entsprechenden Akteure. Im Zeitraum des langfristigen Planungshorizontes hätte dies Vorteile für die Rückführungslogistik in Form einer Transportoptimierung und einer damit einhergehenden Kostensenkung.

[143] An dieser Stelle sei beispielshalber der gezielte Diebstahl von Modulen aufgeführt. Diese externen Effekte stellen aber nicht den Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit dar und werden daher nicht weiter diskutiert. Gleiches gilt für die Diskrepanz zum Datenschutz.

[144] In: http://solardachkataster.leipzig.de/WebOffice/synserver?project=Solar&client=flex, in Zusammenarbeit mit IP SYSCON GmbH.

5.3 Technologische Ansätze und erprobte Verfahren

Ob der Erfahrungen mit Einführungen anderer industrieller Erzeugnisse und der hohen Sensibilität für Umweltbelange besonders bei Photovoltaikkunden aus der Frühphase der terrestrischen Anwendung gehen erste ökologische Betrachtungen, Untersuchungen zu potenziellen Recyclingverfahren und Stoffstromanalysen auf Mitte der 1980er zurück. Laut [Sander *et al.* 2007] registrierten Produzenten und Vertreiber bereits Anfang der 1990er erste Anfragen von Endkunden bezüglich etwaiger Recyclingmöglichkeiten ausgedienter Photovoltaikmodule: „[…] das Bewusstsein für Umweltschutz und Werterhalt von Modulen auch am Ende der Lebensdauer war gerade bei den Käufern der ersten PV-Anlagen schon sehr deutlich ausgeprägt." [Sander *et al.* 2007, Seite 96]

Gezielte Untersuchungen und Forschungsarbeiten zum Modulrecycling auf internationaler Ebene haben ihren Ursprung zu Beginn der 1990er durch Firmen wie:

- AEG und Nachfolgeunternehmen,
- Pilkington Solar International GmbH,
- BP Solar,
- Siemens Solar,
- Soltech und
- Solar Cells Inc.

Aber auch Institutionen wie das National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) aus Japan und das Brookhaven National Laboratory (BNL) aus den USA setzten sich frühzeitig mit dieser Thematik auseinander. Allerdings konzentrierten sich damalige Untersuchungen ob nur geringster Altmodulmengen auf die Integrierung in bereits vorhandenen Stoffkreisläufe. Dieses Vorgehen stellt bis heute den Status quo des Recyclings von $gSSM_{alt}$ dar. Nach der Abtrennung der Verbindungskabel und der Anschlussdosen im Sinne der Erstbehandlung werden Altmodule entweder direkt einem Glasrecycler übergeben oder geschreddert, wodurch die einzelnen Fraktionen zerkleinert und sortiert werden. Die Hauptkomponente Glas wird dann zu Glasfaser oder Glasdämmstoffen weiterverarbeitet, Aluminiumlegierung und Kupfer gehen ins Metallrecycling. Das Silizium und die weiteren Funktionsmaterialien auf Zellenebene werden stofflich nicht recycelt. [Seitz *et al.* 2014]

Die Anschlussdose, die Verbindungskabel und die restlichen BOS-Bestandteile[145] einer Solaranlage sind nicht nur aus der Tabelle 5-9 auf nachfolgender Seite exkludiert, sie werden gleichwohl aus der gesamten nachstehenden Diskussion ausgeklammert. Dies stellt auch in der Literatur die gängige Praxis dar, wie beispielshalber in [Goetzberger und Hoffmann 2010, Seite 140f]: „The electronic and electric components of a PV system such as the inverter, batteries, charge controller, and cable can be recycled by existing and proven technologies without any problems. Installation materials (for example, mounting supports or frames for facade integration of the modules) usually consist of metal (high-grade steel or aluminium), which can be recycled like normal scrap metal." Auch in der deutschsprachigen Literatur wird dieser Sachverhalt ähnlich gehandhabt, wie zum Beispiel in [Wambach und Schlenker 2004]: „Die Metallteile und elektrischen Installationsmaterialien stellen Standardprodukte dar und können über bereits vorhandene Wege zur Metall- und Elektronikschrottverwertung entsorgt werden." oder [Seitz *et al.* 2014]: „Bei den BOS-Bauteilen handelt es sich im Wesentlichen um Komponenten ausder Bau- und Elektrobranche, für die etablierte Rücknahme- und Recyclingsysteme bestehen."

Im Fokus aktueller Bestrebungen steht nunmehr die Nutzung des aus dem zu erwartenden Altmodulstrom resultierenden und verfügbaren (regionalen) Rohstoffpotenzials, weswegen mittlerweile eine verstärkte Konzentration der Forschungsarbeiten und Untersuchungen auf hochwertige Recyclinglösungen zu verzeichnen ist. Das regionale Rohstoffpotenzial ergibt sich aus der Verknüpfung der Prognose der regionalen Altmodulströme und der stoffliche Zusammensetzung eines $gSSM_{sc/mc}$. Tabelle 5-9 auf nachfolgender Seite soll dies für die Region Sachsen samt deutschseitiger Anrainer und Berlin im Zeitraum von 2013 und den folgenden 40 Jahren exemplarisch verdeutlichen. Datengrundlage bilden dabei die regionale Abfallprognose für benannte Region (Anhang 5-3) und die Tabelle 4-28, Kapitel 4.5.6.1 auf Seite 290. Die Daten der Tabelle 5-9 sind indessen als Richtwerte zu verstehen, die dem Leser eine Idee der resultierenden Einzelfraktionen vermitteln soll. Die Abstrahierung der Datengrundlage durch die Annahme der stofflichen Gleichstellung aller berechnungsrelevanten Module in Form des definierten $gSSM_{sc/mc}$ kann selbstverstehend zu enormen Abweichungen der prognostizierten Mengen ob etwaiger stofflicher Divergenz zukünftiger Module führen.

[145] BOS ist eine englische Abkürzung für Balance of System und begreift in der Photovoltaiktechnik alle Systemkomponenten außer die Photovoltaikmodule selbst ein.

Tabelle 5-9: Aus dem Mittelwert der regionalen Abfallprognose sich ergebende Stoffströme der Einzelfraktionen eines $gSSM_{alt}$ exemplarisch für die Region Sachsen samt Anrainer inklusive Berlin im Zeitraum ab 2013 und den folgenden 40 Jahren.

		Altmodule gesamt		**Ingredienzien eines $gSSM_{alt}$ nach der Erstbehandlung**											
							Zellenebene								
	Jahr	**Angaben in MW_p**	**Angaben in t**	**Aluminium-legierung**	**Glas**	**Kunststoffe des Laminatverbundes**	**Kupfer**	**Lötlegierung**	**Aluminium**	**$SGS_{sc/mc}$**	**Silber**	**Siliziumdioxid**	**Siliziumnitrid**	**Σ Blei und Bismut**
Materialanfall	**2013**	83,12	6.843,2	902,57	4.840,7	788,06	62,52	4,85	29,09	211,96	2,08	1,09	0,13	0,18
	2014	69,18	5.695,1	751,14	4.028,5	655,84	52,03	4,03	24,21	176,40	1,73	0,91	0,11	0,15
	2015	58,72	4.834,2	637,60	3.419,6	556,71	44,16	3,42	20,55	149,74	1,47	0,77	0,09	0,13
	2016	48,31	3.977,3	524,58	2.813,4	458,03	36,33	2,82	16,91	123,19	1,21	0,63	0,07	0,11
	2017	38,15	3.140,9	414,26	2.221,8	361,70	28,69	2,22	13,35	97,29	0,95	0,50	0,06	0,08
	2018	37,24	3.066,0	404,38	2.168,8	353,07	28,01	2,17	13,03	94,97	0,93	0,49	0,06	0,08
	2019	37,14	3.057,4	403,24	2.162,7	352,09	27,93	2,16	13,00	94,70	0,93	0,49	0,06	0,08
	2020	37,20	3.062,7	403,95	2.166,5	352,70	27,98	2,17	13,02	94,87	0,93	0,49	0,06	0,08
	2021	37,51	3.088,1	407,30	2.184,5	355,63	28,21	2,19	13,13	95,65	0,94	0,49	0,06	0,08
	2022	37,94	3.123,9	412,02	2.209,7	359,74	28,54	2,21	13,28	96,76	0,95	0,50	0,06	0,08
	2023	38,58	3.175,9	418,88	2.246,6	365,74	29,01	2,25	13,50	98,37	0,96	0,51	0,06	0,09
	2024	36,42	2.998,6	395,49	2.121,1	345,31	27,39	2,12	12,75	92,88	0,91	0,48	0,06	0,08
	2025	34,17	2.813,1	371,02	1.989,9	323,95	25,70	1,99	11,96	87,13	0,85	0,45	0,05	0,08
	2026	36,65	3.017,3	397,95	2.134,3	347,47	27,56	2,14	12,83	93,46	0,92	0,48	0,06	0,08
	2027	41,33	3.402,7	448,80	2.407,0	391,86	31,09	2,41	14,46	105,40	1,03	0,54	0,06	0,09
	2028	46,75	3.848,8	507,62	2.722,5	443,22	35,16	2,73	16,36	119,21	1,17	0,61	0,07	0,10
	2029	57,26	4.714,2	621,77	3.334,7	542,89	43,07	3,34	20,04	146,02	1,43	0,75	0,09	0,13
	2030	75,41	6.208,6	818,87	4.391,8	714,98	56,72	4,40	26,39	192,31	1,89	0,99	0,12	0,17
	2031	103,88	8.551,9	1.127,93	6.049,4	984,84	78,12	6,06	36,35	264,89	2,60	1,36	0,16	0,23
	2032	144,35	11.883,7	1.567,37	8.406,2	1.368,52	108,56	8,41	50,51	368,09	3,61	1,89	0,22	0,32
	2033	193,70	15.946,9	2.103,29	11.280,4	1.836,45	145,68	11,29	67,79	493,94	4,84	2,54	0,30	0,43
	2034	248,19	20.432,7	2.694,93	14.453,5	2.353,03	186,66	14,47	86,85	632,88	6,20	3,26	0,38	0,55
	2035	306,97	25.272,2	3.333,22	17.876,8	2.910,34	230,87	17,89	107,43	782,78	7,67	4,03	0,48	0,68
	2036	368,83	30.364,6	4.004,88	21.479,0	3.496,78	277,39	21,50	129,07	940,52	9,22	4,84	0,57	0,82
	2037	432,18	35.580,2	4.692,78	25.168,4	4.097,41	325,04	25,19	151,24	1.102,06	10,80	5,67	0,67	0,96
	2038	495,36	40.781,6	5.378,81	28.847,7	4.696,40	372,55	28,88	173,35	1.263,17	12,38	6,50	0,77	1,10
	2039	556,28	45.796,7	6.040,25	32.395,2	5.273,93	418,37	32,43	194,67	1.418,51	13,91	7,30	0,86	1,23
	2040	612,90	50.458,0	6.655,05	35.692,5	5.810,73	460,95	35,73	214,48	1.562,89	15,32	8,04	0,95	1,36
	2041	663,28	54.605,7	7.202,10	38.626,5	6.288,38	498,84	38,66	232,12	1.691,36	16,58	8,70	1,03	1,47
	2042	705,71	58.098,7	7.662,80	41.097,3	6.690,64	530,75	41,14	246,96	1.799,55	17,64	9,26	1,09	1,56
	2043	738,81	60.824,1	8.022,26	43.025,2	7.004,49	555,65	43,07	258,55	1.883,97	18,47	9,70	1,15	1,64
	2044	761,70	62.708,2	8.270,76	44.357,9	7.221,46	572,86	44,40	266,56	1.942,33	19,04	10,00	1,18	1,69
	2045	774,01	63.721,5	8.404,41	45.074,7	7.338,16	582,12	45,12	270,86	1.973,72	19,35	10,16	1,20	1,71
	2046	775,95	63.881,4	8.425,50	45.187,8	7.356,57	583,58	45,23	271,54	1.978,67	19,40	10,18	1,20	1,72
	2047	768,29	63.250,9	8.342,35	44.741,8	7.283,97	577,82	44,78	268,86	1.959,14	19,21	10,08	1,19	1,70
	2048	752,31	61.935,4	8.168,83	43.811,2	7.132,46	565,80	43,85	263,27	1.918,39	18,81	9,87	1,17	1,67
	2049	729,71	60.075,0	7.923,46	42.495,3	6.918,23	548,80	42,54	255,36	1.860,77	18,24	9,58	1,13	1,62
	2050	702,51	57.835,8	7.628,13	40.911,4	6.660,37	528,35	40,95	245,85	1.791,41	17,56	9,22	1,09	1,56
	2051	672,90	55.397,5	7.306,53	39.186,5	6.379,56	506,07	39,22	235,48	1.715,89	16,82	8,83	1,04	1,49
	2052	643,04	52.939,1	6.982,29	37.447,6	6.096,46	483,62	37,48	225,03	1.639,74	16,08	8,44	1,00	1,42
	2053	614,91	50.624,0	6.676,94	35.809,9	5.829,85	462,47	35,84	215,19	1.568,03	15,37	8,07	0,95	1,36
	Σ	**13.617**	**1.121.034**	**147.856**	**792.986**	**129.098**	**10.241**	**794**	**4.765**	**34.723**	**340**	**179**	**21**	**30**
			Angaben in Tonnen											

Wenngleich den vorhergehenden Kapiteln folgend im Sinne der Altmodulprognose nicht zulässig, wird an dieser Stelle vereinfachend der Mittelwert der Konfidenzintervalle als Berechnungsgrundlage angenommen (blau hinterlegte Spalte der Tabelle 5-9). Der Materialanfall der Einzelfraktionen ergibt sich aus der multiplikativen Verknüpfung der Schätzwerte für den regionalen annuellen Altmodulstrom in MW_p mit den entsprechenden Beiträgen der Einzelfraktionen in Tonnen je MW_p. Die Summe dieser Einzelbeiträge ergibt in der Konsequenz den gesamten jährlichen Altmodulstrom in Tonnen (orange gekennzeichnete Spalte). Weiter sind der Übersichtlichkeit halber die Einzelfraktionen Ethylenvinylacetat (EVA), Polyethylenterephthalat und Polyvinylfluorid (Tedlar) zu einer gemeinsamen Gruppe zusammengefasst: Kunststoffe des Laminatverbundes. Zudem wurde in der Auflistung auf die Fraktionen Polyphenylenoxid und Bypassdiode verzichtet, da diese ausschließlich ein Bestandteil der im Zuge der Erstbehandlung abgetrennten Anschlussdose sind. Um die in den (regionalen) Installationen gebundenen Rochstoffe, besonders die Funktionsmaterialien auf Zellenebene (olivgrün hinterlegte Spalten der Tabelle 5-9) zu erschließen, sind geeignete qualitative Recyclingverfahren notwendig. Diese müssen sowohl den gesetzlich vorgegebenen Verwertungsquoten Genüge tun als auch die große Bandbreite installierter kristalliner Siliziumsolarmodule verarbeiten, eine ausreichende Sortenreinheit des Outputs liefern sowie ökonomisch und ökologisch sinnvoll arbeiten können. Wie bereits mehrfach geschildert, werden jedoch bereits beim Status quo der Verwertung von Altmodulen die gesetzlichen vorgegebenen Quoten durch die Abtrennung des Frontglases und des Modulrahmens vollends erfüllt. Eine wesentliche Problematik, denen hochwertige Recyclinglösungen gegenüberstehen, ist die große Bandbreite an Altmodulvariationen. Wie in den vorangegangenen Diskussionen bereits mehrfach klar herausgearbeitet, ist nicht von einem einheitlichen Altmodulaufkommen auszugehen. Dies betrifft neben den unterschiedlichen zugrunde liegenden Technologien, wie beispielshalber kristalline Siliziumsolarmodule, Dünnschichtmodule, Stapelzellen et cetera, welche im Sinne der vorliegenden Betrachtung bereits im Kapitel 4.4 eingegrenzt wurden[146], auch die Module in der Klasse der kristallinen Siliziumsolartechnologie selbst. Dabei unterscheiden sich diese nicht nur im grundlegenden Aufbau (Abmaß, Zellen je Modul, Strings je Modul

[146] Die Limitierung der Betrachtung auf die kristalline Siliziumsolarzellentechnologie ist zusätzlich zu den Begründungen des Kapitels 4.4 besonders im Falle des Recyclings sinnvoll, da sich bereits aus den voneinander abweichenden technologischen Wirkungsweisen (vgl. Kap. 3), den Unterschieden des grundlegenden Zellen- /Modulaufbaus und den resultierenden benötigten Fertigungssequenzen (an dieser Stelle sei in besonderem Maße auf die Verfahrensschritte zur Produktion von Substrattechnologien und der dabei verwendeten Serienverschaltung von pin-Zellen hingewiesen) gänzlich andere Randbedingungen an etwaige technologiespezifische sowie allgemeine Recyclingtechnologien ergeben.

et cetera), sondern auch in ihrer tatsächlichen stofflichen Zusammensetzung, Verarbeitung und Schichtung der einzelnen Komponenten. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der integrierten Zellentechnologie, welche sich jeweils in der Anzahl und Art der Zellenkontakte und Busbars sowie in technologischen Spezifikationen wie BSF, FSF, vollflächiger Rückkontakt et cetera unterscheiden und sonach stoffliche Abweichungen der Module bedingen. In toto müssen etwaige Recyclingverfahren, die die Funktionsmaterialien aller seit der Frühphase der terrestrischen Anwendung der kristallinen Siliziumsolartechnologie installierten Module einbegreifen, mannigfaltige Charakteristika etwaiger Altmodule bewältigen können.

In der Tabelle 5-9 sind analog der regionalen Abfallprognose auch Produktionsausschüsse von, in den Grenzen der betrachteten Region, ansässigen Modulproduzenten inkludiert. Zusätzlich können an dieser Stelle auch Niederlassungen von Zellenproduzenten nach Tabelle 5-3, Kapitel 5.2.1.1, Seite 377 einen Beitrag zum Stoffstrom zellenspezifischer Materialien leisten. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung der Fertigung eines $gSSM_{sc/mc}$ zeigt sich, dass weitere Ansatzpunkte möglicher Recyclingaktivitäten entlang der Wertschöpfungskette existieren. Dies betrifft nach [Müller *et al.* 2006] vor allem:

- Seiten, Boden und Kopf der mono- und multikristallinen Siliziumingots,
- fehlerhaft prozessierte Ingots und
- gebrochenen Wafer.

Alle drei Siliziumspezifikationen können ohne Weiteres der Schmelze für neue Ingots zugeführt werden. Auch das im Kapitel 4.5.3.1.2bereits andiskutierte Recycling der zur Wafervereinzelung zugegebenen Trägerflüssigkeit inklusive Abrasivpartikeln ist Stand der Technik. Anders verhält es sich mit dem Schnittverlust während der Wafervereinzelung in Form von $SGS_{sc/mc}$. Laut [Behrendt *et al.* 2010, Seiten 141ff] würde das Recycling des mit der Trägerflüssigkeit und den Abrasivpartikeln verunreinigten abriebbedingten Materialverlustes an $SGS_{sc/mc}$ den jeweiligen Siliziumeinsatz je Modul um rund 35 % senken, wobei dessen Wiedergewinnung jedoch mit dem jetzigen Stand der Technik wirtschaftlich nicht sinnvoll zu betreiben ist. Weiter führen die technisch kostenaufwendige Extraktion des $SGS_{sc/mc}$ und die niedrigen Rohstoffpreise nur zu einem geringen Kostensenkungspotenzial, was eine hohe Hürde zur Verfahrensweiterentwicklung darstellt. Da das Hauptaugenmerk dieser Arbeit indessen auf dem Recycling von Altmodulen liegt, wird die nachstehende Diskussion auf Technologien und Ansätze zum Modulrecycling fokussiert.

Mittlerweile wurde eine Vielzahl verschiedener technologischer Ansätze zum Recycling kristalliner Siliziumsolarmodule entwickelt und teilweise auch erprobt. Wenngleich diese starke verfahrenstechnische Unterschiede aufweisen, begreift das Gros die Rezyklierung der meisten Funktionsmaterialien und der Ingredienzien auf Zellenebene (olivgrün hinterlegte Spalten der Tabelle 5-9) als Ziel mit ein. Eine der technischen Hauptherausforderungen etwaiger Modulrecyclingansätze stellt dabei die Delaminierung, beziehungsweise die Entfernung der Laminatverbundmaterialien dar. Die Realisierung dieser Problematik äußert sich auch als wesentliches Unterscheidungskriterium der verschiedenen Technologien, welche sich grob in:

- mechanische Zerkleinerung,
- thermische Behandlung inklusive Pyrolyse,
- Einsatz organischer Lösemittel und Säuren,
- Quellung,
- Einsatz von Tensiden,
- Modultrennung mittels eines Hochdruckwasserstrahls und
- Kryorecycling

unterteilen lassen. Jene Ansätze werden nun in den subsekutiven Unterkapiteln einzeln betrachtet, wobei das Hauptgewicht der Diskussion auf den technischen Randbedingungen und den zugrunde liegenden Prozessschritten liegen soll. Zudem werden, sofern verfügbar, mögliche Variationen des verfahrensspezifischen Outputs angegeben und etwaige Potenziale beschrieben.

5.3.1 Status quo des Recyclings kristalliner Siliziumsolarmodule

Regional und national bewegen sich die verfügbaren Altmodulmengen weiterhin auf einem vergleichsweise sehr geringen Niveau (vgl. Kapitel 5.2.2.2 und 5.2.2.4), weshalb schlechterdings nicht genügend Mengenströme oder wirtschaftliche Anreize zur Errichtung spezialisierter Modulrecyclingzentren existieren. Dies wird unter anderem auch von [Weckend *et al.* 2016] bestätigt. Wie eingangs des Überkapitels geschildert, werden derzeit Altmodule nach der Erstbehandlung in bestehenden Recyclingprozessen behandelt. Dies geschieht im Falle der kristallinen Siliziumsolartechnologie hauptsächlich durch die Weitergabe an Flachglasrecyclingbetriebe. „Ein PV-Modul besteht zu einem großen Prozentsatz aus Glas. Daher werden Silizium basierte PV-Module vor allem durch Flachglasrecyclingbetriebe bearbeitet. Wir können hier auf Grund der ähnlichen Produktmorphologie, -struktur und -zusammensetzung von PV-Modulen und Flachglasprodukten von wesentlichen Synergien und Kapazitäten profitieren.“ [Knackfuß 2012]

Aus technischer Perspektive erfolgt die Aufbereitung der Solarmodule gemeinsam mit Altglasabfällen nach manueller Abtrennung der Modulrahmung laut [Friege und Kummer 2012b] in folgenden drei Prozessschritten:

1. Brechen und Schreddern
2. Leichtstofftrennung
3. Metallsortierung

Um die Laminatverbundmaterialien abtrennen zu können, muss das Modul aufgebrochen werden. Die nachfolgenden Verfahrensschritte benötigen einheitliche Partikelgrößen, weshalb sich an das Aufbrechen der Module ein Schredderprozess anschließt. Danach erfolgt eine Absaugung der Leichtstofffraktion. Abschließend werden mittels Wirbelstromabscheider oder Magneten die metallischen Bestandteile abgetrennt, was die Funktionsmaterialien jedoch nur bedingt einbegreift. Der resultierende Stoffstrom aus Glaspartikeln kann je nach Güte der Abscheideprozesse noch starke Kontaminationen mit allen weiteren Einzelfraktionen eines Solarmoduls aufweisen. Die Trennung des Glases vom Laminatverbund und den Zellen samt Funktionsmaterialien stellt hier die technische Schwierigkeit dar. Sind die Kunststoff- und/oder Siliziumanteile in der verbleibenden Glasfraktion zu hoch, werden die Qualitätsanforderungen der Floatglasherstellung nicht erreicht. Nach [Weckend *et al.* 2016] werden „verunreinigte“ Glasfraktionen mit 15 bis

20 % anderer Glasfraktionen vermischt und zu Glasfaser, Behälterglas oder Glasdämmstoffen verarbeitet – es wird von Downcycling gesprochen. Ein regionales Beispiel für diese Handhabe stellt die Flachglasaufbereitungsanlage in Torgau dar. Dort werden seit 2009 Produktionsabfälle und Altmodule verwertet.

Aluminiumrahmung und Kupfer werden den dafür etablierten Recyclingprozesses separat zugeführt. Die abgetrennte Leichtstofffraktion geht in Abfallverbrennungsanlagen. Aufgrund der Einfachheit der Verfahrensweise kann dieser Prozess von Flachglasrecyclern mit nur geringen zusätzlichen Investitionskosten implementiert werden. [Weckend *et al.* 2016] Jedoch gilt es zu beachten, dass während des Schredderprozesses in Abhängigkeit der verarbeiteten Modultechnologie (es werden neben kristallinen Siliziumsolarmodulen auch Dünnschichtmodule wie Cadmiumtelluridmodule oder Module aus der CIS/CIGS-Gruppe behandelt) gefährliche Stäube auftreten können, die sich aus Sicht des Arbeitsschutzes nicht in der Anlage frei ausbreiten dürfen. Dieserhalb können je nach Spezifikation auch zusätzlich Abluftreinigungsanalgen nötig sein. Zusammengenommen erfüllt diese Art der Altmodulbehandlung allerdings die nach §22 des ElektroG2 gesetzlich vorgegebenen Mindestquoten.

[Müller *et al.* 2006] führt eine weitere, wenngleich mittlerweile in der Anwendungshäufigkeit kaum mehr anzutreffende Behandlungsstrategie für kristalline Siliziumsolaraltmodule auf: die Mitverbrennung in Abfallverbrennungsanlagen nach Demontage der Aluminiumrahmung.

Beide dargelegten Verfahren entsprechen mit Nichten den Anforderungen eines qualitativ hochwertigen und ökologisch sinnvollen weil die Funktionsmaterialien einbegreifenden und im Vergleich zur Neuproduktion energiesparenden sowie nur eine möglichst geringe Menge ökologisch bedenklicher Chemikalien einsetzenden Recyclings. Jedoch haben kristalline Siliziumsolarmodule laut [Cucchiella *et al.* 2015] nur geringe Mengen wertvoller Materialien inne. Zudem liegen die Kosten der Deponierung der Reststoffe aus beiden Behandlungsverfahren niedriger als die eines hochwertigen Recyclings. Dies hat zur Konsequenz, dass sich Recyclinglösungen, die kein Downcycling darstellen, dermalen immer noch ökonomisch unvorteilhaft gestalten und sich das Gros der Forschungsarbeiten auf das Recycling von Dünnschichtmodulen fokussiert.

5.3.2 Recyclingverfahren der SolarWorld AG

Im Gegensatz zum Status quo der Altmodulverwertung nutzt dieser Recyclingansatz einen thermischen Prozessschritt zur Auftrennung des Laminatverbundes. Des Weiteren stellt dieses Recyclingverfahren laut [Hahne und Hirn 2010] und [Fischer *et al.* 2012] innerhalb der kristallinen Siliziumsolartechnologie einen universellen Ansatz zum Recycling nahezu aller, seit Anbeginn der terrestrischen Nutzung, marktüblichen kristallinen Siliziumsolarmodule dar, wobei jedoch einzelne Verfahrensparameter an die unterschiedlichen Modulspezifikation anzupassen sind. Dieserhalb bedarf die Behandlung der Altmodule eine detaillierte Vorsortierung, was sonach den initialen Prozessschritt repräsentiert. Bevor die kristallinen Altmodule dann dem thermischen Prozess zugeführt werden, ist die Modulanschlussdose zu entfernen. Wenngleich dies durch den § 20 Absatz 1 und 2 in Verbindung mit Anlage 4 sowie des Absatzes 4 des ElektroG2 gesetzlich vorgeschrieben ist, ergibt sich dadurch auch ein verfahrenstechnischer Vorteil: die Bestandteile der Modulanschlussdose würden im Rauchgas mobilisiert werden und zu einem hohen Staubaufkommen im Pyrolyseofen führen. Eine Demontage der Modulrahmung erfolgt indes nicht. Dies hat mehrere Ursachen. Zum einen sind Rahmungen von Modulen verschiedener Hersteller sowie herstellerspezifisch je nach Modulserie auf unterschiedliche Weise befestigt, wobei das Gros entweder verklebt oder verschraub ist. Die manuell Demontage verklebter Rahmungen ist abgesehen eines zusätzlichen Vorbehandlungsschrittes ohnedem nicht möglich. Zum anderen wäre nach [Sander *et al.* 2004] selbst eine händische Trennung geschraubter Rahmungen sehr aufwendig und damit kostenintensiv. Zusätzlich bestünde eine hohe Verletzungsgefahr des Fachpersonals bei der manuellen Demontage ob der scharfen Kanten der Rahmungen. Die gesamte Verfahrenssequenz nach der Vorsortierung und der Entfernung der Modulanschlussdose lässt sich im Wesentlichen in zwei Prozessschritte aufschlüsseln:

1. Thermischer Prozess zur Auftrennung des Laminatverbundes
2. Chemische Behandlung der integrierten Solarzellen oder des Solarzellenbruchs

Zur besseren Verständlichkeit gibt Abbildung 5-20 auf der nachfolgenden Seite einen groben schematischen Überblick des gesamten Recyclingprozesses.

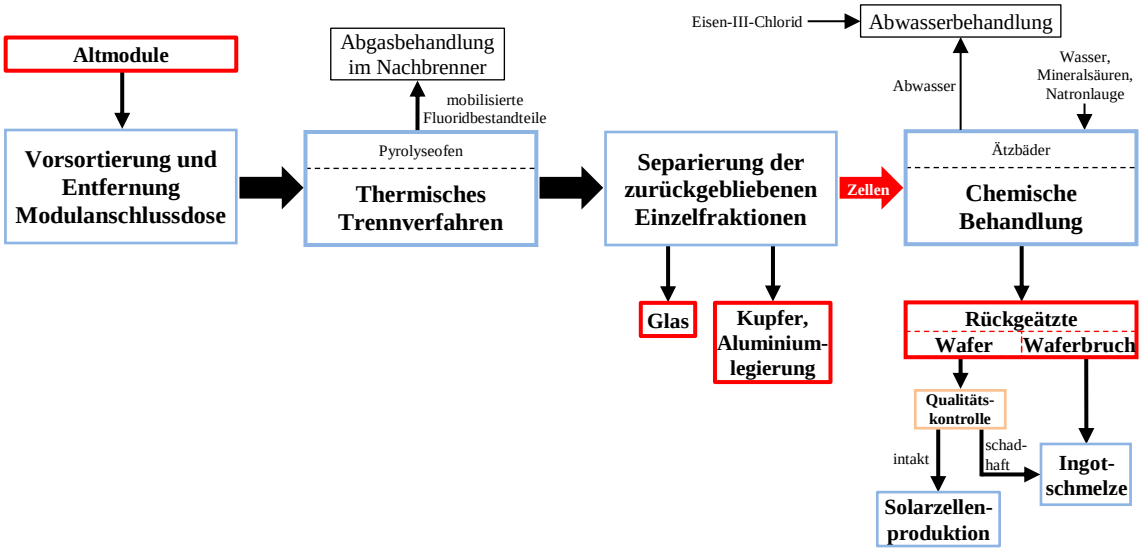


Abbildung 5-20: Grobschema des Recyclingverfahrens der SolarWorld AG.

Nach der Vorsortierung und eventuellen Entfernung der Modulanschlussdose, sofern noch vorhanden, werden die kristallinen Altmodule in Stapelgestellen einem Pyrolyseofen zugeführt. Entsprechend des Aufbaus, der stofflichen Zusammensetzung und der Dimensionen der Altmodule des jeweiligen Batches müssen das Temperaturprofil und die Verweildauer im Pyrolyseofen angepasst werden. Übliche Prozessparameter stellen dabei eine Stunde Verweilzeit im Ofen bei rund 550 °C und einer Aufheizrate von 5 bis 10 °C je Minute dar. Während des Pyrolysevorgangs vergasen die Verbundkunststoffe; zurück bleiben ausschließlich die anorganischen Bestandteile wie das Frontscheibenglas, die Rahmung, die kristallinen Siliziumsolarzellen samt Zellenaufbau und die Zellenverbinder. Das Rauchgas, welches aufgrund der Pyrolyse entsteht, setzt sich hauptsächlich aus Fluoridbestandteilen der Laminatverbundkunststoffe und aus anderen mobilisierten Füllstoffanteilen zusammen, weshalb die tatsächliche Zusammensetzung von Batch zu Batch variiert. Das Rauchgas wird bei rund 800 °C in einem Nachbrenner gereinigt[147], wobei dessen absoluter Wärmestrom wiederum von der realen Gasemission aus dem thermischen Prozess abhängig ist. Laut [Sander *et al.* 2004] können neben bereits genannten anorganischen Materialien auch vereinzelt Füllstoffrückstände als Output aus dem thermischen Prozess vorliegen. Wenngleich diese sich während der Pyrolyse feinpulvrig auf dem Glas oder den Zellen ablagern können, ist deren Existenz direkt von der stofflichen Zusammensetzung der Module, die im entsprechenden Batch behandelt wurden, abhängig. Jene unerwünschten Rückstände treten zumeist nur bei älteren

[147] Neuere Erkenntnisse zeigen auch einen Metallgehalt im Rauchgas, wobei besonders der Bleianteil ökologische Relevanz besitzt und adäquate zusätzliche Reinigungsmaßnahmen bedingt. Nähere Informationen diesbezüglich finden sich in [Tammaro *et al.* 2015].

Modulvarianten auf, da sie beispielshalber auf die Existenz von Titandioxid (TiO_2) zurückzuführen sind. Wie bereits mehrfach aufgeführt, wurde TiO_2 durch die Verwendung von Siliziumnitrid (Si_3N_4) als Antireflexionsschicht abgelöst und findet sich in moderneren Modulen sonach nicht mehr. Bei Auftreten werden diese feinpulvrigen Füllstoffrückstände anschließend abgesaugt und deponiert. Der ob der Absenz der Verbundkunststoffe lose vorliegende, anorganische Output des thermischen Verfahrensschrittes wird anschließend in die Einzelfraktionen Glas, Metalle und Zellen- bzw. Zellenbruch separiert. Die Aluminiumlegierung (Rahmung) und das Kupfer mit Lötverzinnung (Zellenverbinder) gelangen in die dafür etablierten Metallrecyclingkreisläufe. Die Glasfraktion kann bei guter Verfahrensführung direkt der Floatglas- oder der Hohlglasherstellung zugeführt werden weil in ausreichender Reinheit und Qualität anfallend. Solarzellen und Solarzellenbruch werden einem zusätzlichen Verfahrensschritt unterzogen: der chemischen Behandlung in Ätzbädern.

Vorrangiges Ziel der chemischen Behandlung der aus der Separierung zurückgebliebenen Solarzellen und des Solarzellenbruchs ist die Rückgewinnung ganzer kristalliner Siliziumwafer[148] und gereinigten Waferbruchs. Hierfür müssen die Zellen und der Zellenbruch nacheinander mehrere selektive Ätzbäder durchlaufen, die in der Reihenfolge an den entsprechenden Zellenaufbau gekoppelt sind. Die technische Schwierigkeit dieser Teilschritte stellt die Anpassung der verschiedenen Ätzlösungen an die unterschiedlichen weil herstellerspezifischen Schichtsysteme und die sich daraus ergebende stoffliche Zusammensetzung des Solarzellenaufbaus der kristallinen Siliziumsolarzellen dar. Wenngleich dies jedoch durch die initiale Vorsortierung der Altmodule als Prozessinput batchintern keine Problematik aufwirft, ergeben sich sonach unterschiedliche Anforderungen und Zusammensetzungen der entsprechenden Ätzlösungen je Batch. Einen ersten Ätzschritt haben indes alle Batches gemeinsam: die Entfernung organischer Reste aus dem thermischen Prozess (Pyrolyserückstände) mittels eines Gemisches aus Kaliumhydroxid (KOH) und Wasserstoffperoxid (H_2O_2). Laut [TU Bergakademie Freiberg 2005] ergibt sich allerdings durch den Einsatz dieser Ätzlösung eine hohe Anforderung an die Verfahrenssteuerung, da basische Ätzlösungen ein anisotropes Ätzverhalten auf der Oberfläche des Siliziums bewirken. Die Verweildauer in diesem Ätzbad ist dieserhalb so gering wie möglich zu halten. Im Anschluss an die Reinigung der Zellen

[148] Neben der Rückgewinnung als kristalliner Siliziumrohwafer ist gleichwohl die Rückgewinnung in Form der Spezifikation: „p-dotierter, texturierter, kristalliner Siliziumwafer“ möglich. Die Unterscheidung beider Spezifikationen wurde bereits im Kapitel 4.5.4.1 eindeutig getroffen.

oder des Zellenbruchs von den organischen Pyrolyserückständen werden die Metallisierungen, die Antireflexionsschicht und der pn-Übergang (im Falle einer p-dotierten Basis der n^+-Emitter) der Zellen(teile) entfernt. Die Ätzsequenzen erfolgen dabei analog umgekehrt der Fertigungssequenz der kristallinen Siliziumsolarzellen (vergleich hierzu die Übersicht Anhang 4-11 für die definierte Standardzelle). Im Falle der Metallisierungsschichten zeigt sich der enorme Anpassungsbedarf der Ätzlösung ob der mannigfaltigen Zellenlayouts und der unterschiedlichen Zusammensetzungen der Druckpasten. Infolge der Vielzahl etwaiger Variationen beider Parameter kann an dieser Stelle kein Katalog entsprechender Ätzlösungen angegeben werden, vielmehr wird der interessierte Leser auf die umfangreichen Angaben diesbezüglich in [TU Bergakademie Freiberg 2005], [Park und Park 2014] sowie [Klugmann-Radziemska und Ostrowski 2010] verwiesen. Allgemein lässt sich jedoch folgendes festhalten. Die Frontkontakte bedürfen ob des Silbergehaltes einer sauren Ätze. Mögliche Gemische beinhalten zumeist Salpetersäure (HNO_3). Für den beispielhalber vollflächigen Aluminiumrückkontakt wird eine basische Ätze mittels Natronlauge (NaOH) eingesetzt. [Friege und Kummer 2012b] geben zudem die Möglichkeit der Verwendung einer Aluminiumchloridlösung an, die eine Auflösung des Aluminiumrückkontaktes unter Bildung eines basischen Polyaluminiumchlorids bewirkt. Das so erzeugte Polyaluminiumchlorid selbst wird in der Papierindustrie und der Abwasserreinigung eingesetzt. Diese Handhabe ist ebenfalls Gegenstand des Recyclingansatzes der Loser Chemie GmbH, welcher im Kapitel 5.3.4 separat betrachtet wird. Zur Entfernung der Antireflexionsschicht, die im Falle modernerer Zellendesigns aus Si_3N_4 besteht, werden Ätzbäder aus Fluorwasserstoff (HF) und Salpetersäure genutzt. Besteht die Antireflexionsschicht noch aus TiO_2 (wie bei älteren Modellen üblich) kommen HF und KOH zum Einsatz. Anschließend wird der pn-Übergang mittels der Entfernung des n^+-Emitters rückgeätzt. Dies ist ein besonders sensibler Abschnitt der gesamten chemischen Behandlung und stellt hohe Anforderungen an die Verfahrenssteuerung und -überwachung. Einsatz findet ein ternäres Gemisch aus Wasser, Salpetersäure und Fluorwasserstoff, welches je nach Molanteilen der drei Stoffe stark abweichende Ätzraten des Siliziums effiziert sowie unterschiedliche Auswirkungen auf die resultierenden Oberflächen besitzt. Bereits geringfügige Änderungen der Molverhältnisse zeitigen enormen Einfluss auf die Ätzraten, welche insgesamt Dimensionen zwischen 10 und knapp 4.000 nm je Sekunde annehmen können. Das entsprechende Gibbsche Dreieck mit den zugehörigen Ätzraten findet sich in [TU Bergakademie Freiberg 2005, Seite 12, Abbildung 9]. Wird beispielshalber eine Ätzrate von 2000 nm je Sekunde bei einer

Zellendicke von 180 µm (definierte Standardzelle) zugrunde gelegt, wäre infolge des beidseitigen isotropen Ätzvorgangs die kristalline Siliziumsolarzelle nach 45 Sekunden vollständig aufgelöst. Werden die Ätzraten zu gering gehalten, ergeben sich Ätzzeiten, mit denen der Prozess nicht wirtschaftlich zu betreiben ist. Zu beachten bleibt dabei jedoch, dass lediglich der 250 nm dicke n^+-Emitter und je nach Anforderungen das BSF zu entfernt sind. Zudem ergeben sich aus den Mischungsverhältnissen des ternären Systems, wie bereits angedeutet, unterschiedliche Auswirkungen auf die zurückbleibenden Siliziumoberflächen. Das entsprechende Gibbsche Dreieck findet sich wiederum in [TU Bergakademie Freiberg 2005]. Wichtig ist, dass schon aufgrund der vorangegangenen Ätzschritte zur Reinigung, Entmetallisierung und Entfernung der Antireflexionsschicht eine stark geschädigte Siliziumoberfläche vorliegt. Dieserhalb kann je nach Anforderungen an den Output eine Änderung des Mischungsverhältnisses des Ätzsystems während des Prozesses notwendig sein. Grundvoraussetzung ist ob der gestörten Oberflächen im ersten Schritt immer eine Politurätze, welche beim Vergleich beider Gibbschen Dreiecke im Bereich der hohen Ätzraten liegt. Eine anschließende Änderung des Molverhältnisses in den Bereich niedriger Ätzraten ermöglicht eine Strukturätze, weshalb als Prozessoutput neben einem polierten kristallinem Siliziumrohwafer, beziehungsweise Waferbruch in SGS-Qualität, auch ein Wafer der Spezifikation „p-dotierter, texturierter, kristalliner Siliziumwafer“ möglich ist. Jeder dieser Outputformen erfüllt bei ordnungsgemäßer Prozessführung die Standards seines neuproduzierten Pendants und dessen Qualitätsanforderungen. Nebst diesen Outputspezifikationen ergeben sich gesamtheitlich je nach Zustand, Qualität und Design der kristallinen Altmodule als Input des Recyclingverfahrens sowie der Güte der Prozessführung in toto folgende Outputs:

- Edelstahl oder Aluminiumlegierung aus der Modulrahmung (ältere Modelle besitzen im Gegensatz zum definierten $gSSM_{sc/mc}$ eine Edelstahlrahmung);
- die Zellenverbinder, bestehend aus Kupfer und Lötverzinnung;
- Frontscheibenglas;
- zu deponierende Füllstoffrückstände aus der Pyrolyse sowie Rückstände aus der Rauchgasreinigung;
- gebrauchte Chemikalien[149], Abwasser und Abluft.

[149] Laut [Sander *et al.* 2004] fallen geschätzte ein bis zwei Tonnen zu entsorgende Chemikalien je 30.000 bis 50.000 recycelten Wafern an.

Für die Qualität des Gesamtprozesses der chemischen Behandlung und damit des generierten Outputs ist die Vollständigkeit der einzelnen Ätzprozesse essentiell. Wurde etwa die Zellenmetallisierung nicht vollständig entfernt, lässt sich die Antireflexionsschicht nicht vollflächig rückätzen. Zudem ist die Bildung von Ätzgruben eine mögliche Konsequenz. Indes können etwaige, auf den resultierenden Wafern zurückgebliebene Schattenbilder der Metallisierungsschichten bei der Fertigung neuer Solarzellen problemlos überdruckt werden. Einzelne Studien wie beispielshalber [Sander *et al.* 2007] schreiben Solarzellen, welche aus recycelten Wafern gefertigt werden, unter gewissen Umständen sogar geringfügig bessere Wirkungsgrade als ihren erstgefertigten Pendants zu. Zum einen besitzen recycelte Wafer bei adäquater Prozessführung mindestens gleichwertige elektrische Eigenschaften. Zum anderen können vereinzelt Reste eines BSF in einem recycelten Wafer zurückbleiben, welche bei lagerichtiger Neuprozessierung und gleichartiger Fertigung verglichen zu erstgefertigten Zellen den Effekt des BSF verstärken. Wenngleich dieses Recyclingverfahren bei intakten Zellen als Input (schließt versteckte Defekte wie Mikrorisse aus) vollständige Wafer als Output generieren kann, ergibt sich ob der Handhabbarkeit immer dünner werdender Zellen ein erhöhtes prozessinternes Bruchrisiko. Nähere Ausführungen hierzu finden sich in Kapitel 5.5.2.1: „Zellen und Verbinder“. Insgesamt sollen laut [Sander *et al.* 2004] bis zu 98 % der eingehenden Zellen zurückgewonnen werden können, unabhängig ob als Wafer oder gereinigter Bruch.

Zwei Beispiele sollen die technische Leistungsfähigkeit dieses Recyclingverfahrens verdeutlichen und resultierende Recyclingraten des Gros der Outputfraktionen angeben. Zum einen kam dieses Verfahren im Jahr 2005 beim Recycling der ältesten deutschen Photovoltaikgroßanlage, installiert im Jahre 1983 auf der Insel Pellworm, zum Einsatz. Diese umfasste ursprünglich eine Installationsleistung von 300 kW_p. Nach der Pyrolyse von 15.795 Modulen (entspricht 252,72 kW_p bei einem Wirkungsgrad von 8 %) konnten obschon des fortgeschrittenen Alters der Anlage rund 84,9 % der Zellen intakt entnommen werden. Ein Grund dafür ist vor allem die bei der Erstprozessierung standardmäßig verwendete Waferdicke von 400 µm, was im Gegensatz zu heutigen Schichtdicken von 180 µm eine bessere mechanische Stabilität bedingt. Als Besonderheit beim Recycling dieser Anlage war nach der pyrolytischen Behandlung der einzelnen Module zur Auflösung des Laminatverbundes ob der damaligen Fertigungsweise ein zweiter thermischer Prozess nötig, um die ultraschallverschweißten Zellenverbinder von

der Zellenoberfläche zu entfernen. Nach dem sich anschließenden Ätzprozess waren mitunter Löcher in Zellen infolge der tiefen Lötpunkte zu erkennen, wodurch weiterer Ausschuss generiert wurde. Ergebnis des Recyclings war eine Neuprozessierung der Anlage auf Basis der recycelten Wafer mit einer Leistung von 237,589 kW_p bei einem Wirkungsgrad von 13 % (entspricht 94 % der Ausgangsleistung bezogen auf die Anzahl tatsächlich recycelter Module). Durch den Einsatz fortgeschrittener Produktionstechnologien und dem damit erzielten höheren Wirkungsgrad konnte sonach der Prozessausschuss an defekten Wafern nahezu kompensiert werden. Zudem konnten 3,263 Tonnen Edelstahl (aus der Rahmung) verkauft, 487 kg Zellenbruch vom Recyclingprozess und 149 kg von der Neuprozessierung der Zellen gesammelt und der Neuproduktion von SGS-Ingots zugeführt sowie 18 Tonnen Glas ins Glasrecycling gegeben werden. [Bombach *et al.* 2006]

Das andere Beispiel bezieht sich auf das Recycling von 1.900 Modulen des ältesten belgischen Solarparks Chevetogne (1983 installiert) im Jahr 2009. Nach [Binder 2013] und [Hahne und Hirn 2010] ergaben sich daraus die in der Tabelle 5-10 aufgeführten Recyclingquoten samt der erreichten Reinheiten.

Tabelle 5-10: Ergebnisse des Recyclings der Chevetogneanlage nach [Binder 2013] und [Hahne und Hirn 2010].

		Input je Modul	**Output je Modul**	**Ausbeute**	**Reinheit**
	Einheit	kg	kg	%	%
Fraktion	**Glas**	5,93	5,75	96,96	99,99975
	Verbundkunststoffe	0,94	Energiegewinnung		> 99,995
	Zellen (teilweise gebrochen)	0,26	0,22	84,62	
	Kupfer	0,09	0,07	77,78	100,00
	Aluminium	1,58	1,58	100,00	100,00
	Anschlussdose	0,21	Elektronikschrott		
	Gesamt	9,01	7,62	84,57 [a]	

a: inklusive 0,24 kg Mischkomponenten

Das in diesem Unterkapitel diskutierte Recyclingverfahren für kristalline Altmodule ist das Resultat eines durch das Bundesumweltministerium geförderten Verbundprojektes von Forschern der TU Bergakademie Freiberg und der Deutschen Solar AG, welches erst kleinmaßstäblich erprobt und im Juni 2003 in Form einer Pilotanlage am Standort der Deutschen Solar AG (SolarWorld AG) in Freiberg in Betrieb ging. Wenngleich ursprünglich die Rückgewinnung ganzer Wafer aus unbeschädigten Solarzellen ein Verfahrensziel

darstellte, wurde davon infolge wirtschaftlicher Überlegungen abgesehen. In Abhängigkeit der Vorschädigung der Altmodule (betrifft allgemeinen Zustand sowie Schäden durch den Rückbau und -transport), des Moduldesigns und der Art der integrierten Siliziumsolarzellen können nach [Sander *et al.* 2007] Ausbeuten zwischen 0 und 98 % erzielt werden. Besonders die zugrunde liegende Zellendicke stellt ein wesentliches Kriterium dar. Dies bestätigen auch [Fischer *et al.* 2012] und [Binder 2013], die heutigen Standarddicken von 180 µm keine ökonomisch sinnhafte Ausbeuten intakter Zellen aus der Pyrolyse zuschreiben. Zudem lassen sich mittels dieses Recyclingansatzes Altzellen (nur) rund viermal recyceln, da der Ätzvorgang einen leichten Materialverlust bedingt. Weiter unterscheiden sich Solarzellen aus Altmodulen, die vor beispielshalber 20 Jahren installiert wurden und gegebenenfalls jetzt als Altmodule anfallen, in ihren Schichtdicken enorm von modernen Solarzellen. Wenngleich die Rückgewinnung dickerer Solarzellen mit höheren Ausbeuten zu erzielen ist, ist der Einsatz deren recycelter Wafer sonach stark limitiert. Dieserhalb wurde die Verfahrenssequenz so umfunktioniert, dass obschon der ökologischen Vorteile der Gesamtbilanz, die mit einem Output als Wafer einhergehen (Vermeidung des abrasiven Materialverlustes währen Wafervereinzelung), gereinigter Waferbruch gewonnen wird. Hierzu wird der Recyclingsequenz vor den Ätzschritten noch ein Zerkleinerungsprozess vorgeschalten. Demnach spielt es auch keine Rolle, ob Solarzellen aus Altmodulen etwaige Vorschädigungen aufweisen (Mikrorisse et cetera). Der auf diese Weise gewonnene Output entspricht vollends den Anforderungen an raffiniertes SGS_p, welches in Ingots eingeschmolzen wird und zur Fertigung neuer kristalliner Siliziumsolarwafer dient.

Neben dieser verfahrenstechnischen Anpassung waren weitere Optimierungsmaßnahmen Gegenstand prozessspezifischer Forschungsvorhaben. Zumeist standen dabei die genutzten Ätzchemikalien und die Rückgewinnung der darin gelösten Metalle im Fokus. Laut [Sander *et al.* 2004] wurde stellenweise an Kaskadennutzungen der verwendeten Chemikalien geforscht. Auch die Substitution einzelner Ätzchemikalien durch weniger toxische und geringer umweltschädliche Ätzlösungen wurde untersucht. Beispielhaft soll an dieser Stelle die Substitution der Salpetersäure aufgeführt sein. Diese fällt während des gesamten Verfahrens in großen Mengen an. [TU Bergakademie Freiberg 2005] schreibt in diesem Zusammenhang besonders der Ätzlösung bestehend aus Fluorwasserstoff und Salpetersäure eine hohe ökologische und ökonomische Problematik zu, die sich aus deren Entsorgung ergibt. Eine Substitution der Salpetersäure durch stickstoffhaltige

Salze erzielt derselben Quelle nach vielversprechende Ergebnisse diesbezüglich. Bei der Rückgewinnung der in den Ätzgemischen gelösten Metalle[150] nimmt das Silber aus den Zellenkontakten eine zentrale Rolle ein. Kristalline Siliziumsolarzellen aus der Frühphase der terrestrischen Anwendung besitzen teilweise reine Silberbeschichtungen. Eine Möglichkeit besteht in der Behandlung mittels Salpetersäure unter Bildung von Silbernitrat ($AgNO_3$). Die eingesetzte Ätzlösung samt des gelösten Silbers müsste dann einem weiteren Verfahrensschritt wie etwa einer Fällung, Elektrolyse oder Zementation zur Rückgewinnung des Silbers unterzogen werden. Infolge der bereits im Kapitel 4.5.4.2 diskutierten Reduzierung des Silbergehaltes in den Druckpasten selbst und der reduzierten Menge eingesetzter Druckpaste je Solarzelle sowie die industriell angestrebte Substitution des Silbers durch Kupfer (weiter Informationen dazu im Kapitel 5.5.2.1: „Zellen und Verbinder“) wird der Silberrückgewinnung aus wirtschaftlicher Sicht jedoch immer weniger Bedeutung zugesprochen. [Sander *et al.* 2007]

Der Betrieb der Pilotanlage am Standort Freiberg war sehr rohstoff- und energieaufwendig[151]. Zudem verursachten die manuelle Separation sowie die manuelle Zufuhr der Altmodule in den Prozess hohe Kosten. Eine weitere Belastung ergab sich aus der heterogenen Zusammensetzung der Pyrolysegase und deren Reinigung. Als Resultat wurde die Anlage im Jahr 2011 demontiert. [Binder 2013] Allerdings gab es bereits 2008 auf Basis der Erkenntnisse aus der Pilotanlage Bestrebungen, eine vollautomatisierte, energieoptimierte und großtechnische Anlage zu entwickeln. Hierfür wurde im Verbundprojekt „SoMoRec“ im Jahr 2008 mit dem bifa Umweltinstitut kooperiert. Es wurde erwartet, dass die neue vollautomatisierte Anlage bei gleicher Ausbeute lediglich ein Drittel der Umweltbelastungen generiert bei vorerst kostendeckender Arbeitsweise. Im September 2011 gründete die SolarWorld AG als Mutterkonzern mit der Preiss-Daimler Group und anderen Partnern aus der chemischen Industrie das Joint Venture SolarCycle GmbH zur Projektierung jener Recyclinganlage der zweiten Generation mit Standort in Bitterfeld und einer angestrebten Kapazität von jährlich 30.000 Tonnen Altmodule. Aufgrund ausbleibender Massenströme und Werksschließungen von Modulproduzenten am Standort Bitterfeld (zieht das Ausbleiben von Produktionsausschüssen nach sich) wurde die SolarCycle GmbH am 13.05.2014 allerdings wieder aufgelöst und die Liquidation beendet.

[150] Einen gesamtheitlichen Überblick zu dieser Thematik gibt [Jung *et al.* 2016].

[151] Hoher Energieaufwand als Verbrauch an elektrischer Energie und Erdgas für den thermischen Prozess als auch für den Ätzvorgang.

5.3.3 Recyclingansatz nach Park *et al.* 2016

Dieser Recyclingansatz ähnelt in seinen Einzelschritten dem vorbezeichneten Prozess der SolarWorld AG bis auf eine Ausnahme: der Substitution der Ätzschritte zur Entfernung der Antireflexionsschicht sowie des Emitters und damit des pn-Übergangs mittels eines Schleifprozesses. Im ersten Schritt werden die Altmodule nach deren Erstbehandlung ebenfalls einem thermischen Prozess zur Auftrennung des Laminatverbundes unterzogen. Die optimale Aufheizrate wird mit 15 °C je Minute unter Umgebungsbedingungen bei einer Endtemperatur von 480 °C angegeben. Ein hervorzuhebender Unterschied zum thermischen Trennverfahren der SolarWorld AG besteht darin, dass die Altmodule währenddessen in eine Spezialvorrichtung eingespannt sind. Diese dient der mechanischen Stabilisierung der Solarzellen beim Entweichen der Zersetzungsgase der Verbundfolien und bewirkt besonders bei dünnen Solarzellen (≤ 250 µm) eine Senkung der Bruchrate. Laut [Park *et al.* 2016] können infolge des thermischen Zersetzungsprozesses der Verbundfolie ob der Vergasung hohe Drücke zwischen Glas und Zellen entstehen. Die entwickelte Spezialvorrichtung drückt einerseits gleichverteilt auf die Zellenrückseiten und verleiht somit den Zellen eine erhöhte Druckfestigkeit. Der entstandene Gasstrom zwischen Frontglas und Solarzelle entweicht seitlich. Andererseits können die Zersetzungsgase der einstmaligen Modulrückseitenfolie über spezielle Furchen auf der Kontaktfläche der Spezialvorrichtung entweichen, weshalb die Zellen auch auf ihrer Rückseite keinen mechanischen Stress während des thermischen Vorgangs ausgesetzt sind. Gleichwohl gibt [Park *et al.* 2016] ebenfalls die Notwendigkeit einer adäquaten Rauchgasreinigung mittels Elektro- oder Gewebefilter an.

Die entnommenen (ungebrochenen) Solarzellen werden danach analog des vorbeschriebenen Verfahrens einem Ätzschritt zur Entfernung der Frontseitenmetallisierung durch den Einsatz einer 60 %-igen Salpetersäure für 120 Sekunden unterzogen. Zur Entfernung der Antireflexions- und Emitterschicht wurde die Behandlung auf Basis von Fluorwasserstoff durch einen mechanischen Schleifprozess substituiert. In der Absenz dieser Chemikalie und damit dem verringerten gesamten Chemikalieneinsatz begründet [Park *et al.* 2016] die Ökofreundlichkeit dieses Recyclingverfahrens. Für den mechanischen Schleifprozess werden die Solarzellen in einer Keramikhalterung eingespannt und mit der Zellenfrontseite unter Zugabe von ungebranntem Siliziumcarbidpulver 20 Minuten auf einem Schleifteller mit einer Drehgeschwindigkeit von 20 Umdrehungen je Minute behandelt. Die zurückgebliebene Waferoberfläche weist aufgrund des Schleif-

prozesses mit dem zugegebenen Schleifadditiv starke Beschädigungen und Unebenheiten auf. In einer abschließenden chemischen Behandlung des Wafers mittels einer 45 %-igen Kaliumhydroxidlösung werden diese zusammen mit dem vollflächigen Aluminiumrückkontakt beseitigt. Der Ätzschritt erfolgt bei 80 °C und dauert circa 10 Minuten. Neben dem Modulglas, der Rahmung und Silbernitrat liefert dieser Recyclingansatz als Output kristalline Siliziumrohwafer, die laut [Park *et al.* 2016] nahezu gleiche Eigenschaften wie neuproduzierte Wafer besitzen. Lediglich die Waferdicke ist aufgrund der Ätz- und Schleifprozesse geringfügig kleiner. Eine initial 200 µm dicke Solarzelle zeitigt nach Druchlaufen des Recyclingansatzes einen rund 180 µm dicken Rohwafer. Die Möglichkeit zur Generierung der Spezifikation: „p-dotierter, texturierter, kristalliner Siliziumwafer“ besteht indes ob des Schleifprozesses und der gleichzeitigen Ätze der Schleifschäden und des Rückkontaktes nicht. Darüber hinaus sollen auf Basis dieser recycelten Wafer prozessierte Solarzellen einen vergleichbaren Wirkungsgrad wie gleichermaßen prozessierte Solarzellen auf Basis neuer Wafer effizieren. Diese Verfahrensvariation wurde 2016 veröffentlicht und wird dieserhalb bisher nur im labortechnischen Maßstab betrieben.

5.3.4 Recyclingansatz der Loser Chemie GmbH

Ursprung dieses Recyclingansatzes lag nach [Schönherr 2013] darin, dass die Loser Chemie GmbH ob steigender Rohstoffpreise eine Möglichkeit zur Substitution des benötigten Prozessinputs Aluminium gesucht hat. Es wurde ein nasschemisches Verfahren entwickelt, um das in kristallinem Siliziumsolarzellenbruch enthaltenen Aluminium zugänglich zu machen. Hierfür wird der Solarzellenbruch in einem ersten Schritt mit Salzsäure (HCl) unter Bildung von Aluminiumchlorid ($AlCl_3$) behandelt. Bei Zugabe von Wasser reagiert das Aluminiumchlorid mit dem restlichen Aluminium des Zellenrückkontaktes zu Polyaluminium(hydroxid)chlorid. Dieses Reaktionsprodukt findet, wie bereits im Kapitel 5.3.2 beschrieben, Anwendung als Flockungsmittel in der Abwasserreinigung und der Papierindustrie. Weiter wird das in der Frontmetallisierung enthaltene Silber mittels eines organischen Schwefelverbundes und Salzsäure unter Bildung von Silberchlorid in Lösung gebracht und abgetrennt. Die übrig gebliebenen entmetallisierten Solarzellenbruchstücke können laut [Friege und Kummer 2012a] sowie [Kernbaum und Hübner 2013] nach einer sich anschließenden Wäsche und Trocknung

als Grundstoff zur erneuten Waferproduktion eingesetzt werden. Ohne vorgeschalteten zusätzlichen Prozess zur Auftrennung des Laminatverbundes eignet sich das Verfahren jedoch nur zur Behandlung von kristallinem Siliziumsolarzellenbruch. Denkbar sind diesbezüglich sowohl eine mechanische Zerkleinerung von Altmodulen als auch die thermische Verbundauftrennung. Mögliche Quellen von Solarzellenbruch sind neben Produktionsausschüssen auch abgetrennte Fraktionen aus dem im Kapitel 5.3.1 beschriebenen Status quo der Altmodulbehandlung. Nebst der Entmetallisierung von kristallinem Siliziumsolarzellenbruch handelt es sich im Falle des Recyclingansatzes der Loser Chemie GmbH hauptsächlich um ein universelles Verfahren zur Extraktion aller in Dünnschichtmodulen enthaltenen Metalle mittels Methansulfonsäure (CH_4O_3S). Laut [Palitzsch 2013] soll das aus dem Recycling von Dünnschichtmodulen gewonnene Modulfrontseitenglas noch leichte Anteile der Antireflexionsbeschichtung beinhalten, was sich dieserhalb hervorragend für den Bau von Gewächshäusern eignet. Die gesamte Bandbreite des Modulrecyclings befindet sich nach [Beckmann 2012], [Wambach 2013] und neueren Unternehmensmeldungen noch im Pilotanlagenstatus mit Standort im sächsischen Langenweißbach.

5.3.5 Recyclingverfahren der LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG

Die LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG verfolgt einen völlig anderen verfahrenstechnischen Ansatz zur Auftrennung des Laminatverbundes und der darauf basierenden Separierung der Einzelfraktionen. Das Verfahren wurde am 07.08.2012 EU-weit patentiert unter der Patentnummer: EP 2556893 A2. Grundlage der Verbundauftrennung ist das Prinzip zur Nutzung der unterschiedlichen materialspezifischen Wärmeausdehnungskoeffizienten bei tiefen Temperaturen: die kryogene Verbundmaterialientrennung – oder im vorliegenden Fall das sogenannte Kryorecycling. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Verbundmaterialien entstehen bei den verfahrensspezifischen Temperaturen von unter -200 °C an den Materialgrenzflächen Verspannungen, die bei einer anschließenden Zerkleinerung als Sollbruchstellen fungieren. Laut der Patentschrift können im Recyclingprozess sowohl kristalline Siliziumsolarmodule als auch Dünnschichtmodule und LCD-Displays recycelt werden. Zum leichteren Verständnis der sich anschließenden Diskussion der einzelnen

Prozessschritte findet sich in nachstehender Abbildung 5-21 die gesamte Verfahrenssequenz als Grobschema dargestellt, wobei diese sich an der entsprechenden Patentschrift orientiert.

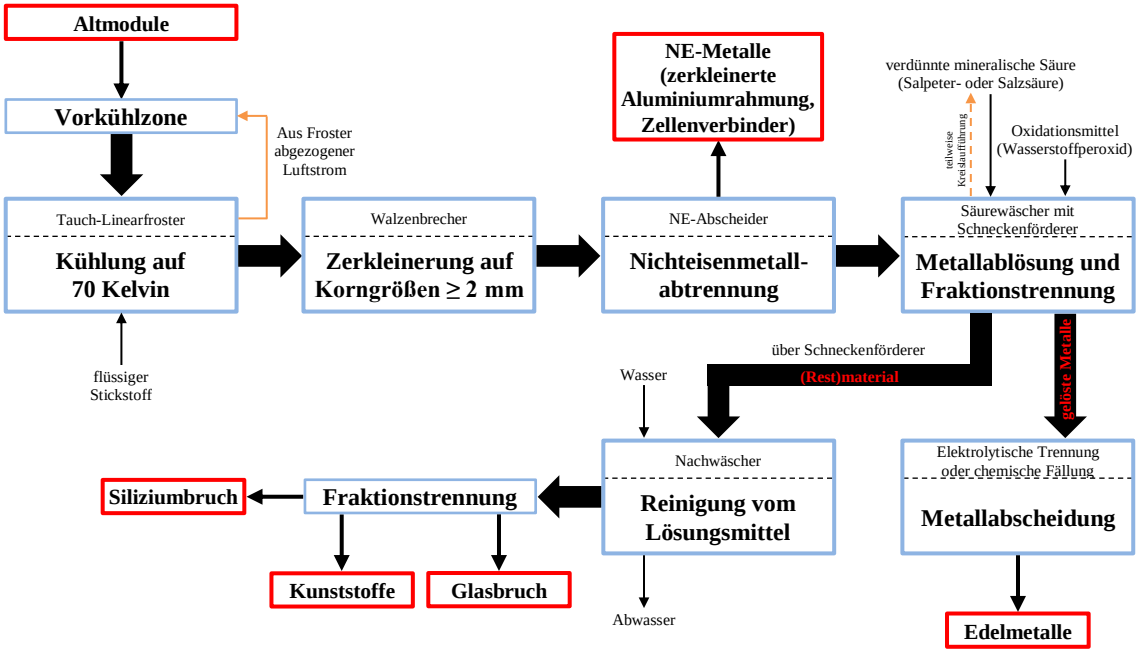


Abbildung 5-21: Grobschema des Recyclingverfahrens der LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG.

Laut [Schultz *et al.* 2013] besteht die Hauptaufgabe des als nachfolgend mit Kryorecycling bezeichneten Verfahrens darin, etwaige Verbundmaterialen flächenmäßig zu trennen und mögliche enthaltenen Metalle auf eine ökologische Weise zurückzugewinnen. Hierfür wird die Inputfraktion, im vorliegenden Fall kristalline Siliziumsolaraltmodule, einem Tauch-Linearfroster zugeführt. Diesem ist ein Vorkühler direkt vorgeschalten, der die Altmodule mittels eines aus dem Froster abgezogenen Kaltluftstromes vorkühlt. Dies ist laut [Schultz *et al.* 2013] auf eine ökonomisch optimierte Verfahrensweise zurückzuführen, sodass die Altmodule nicht mit Umgebungstemperatur in den Linearfroster aufgegeben werden. Weiter ist zu erwähnen, dass infolge der Erstbehandlung die Modulanschlussdosen vor der kryogenen Behandlung demontiert wurden, die Modulrahmungen indessen nicht. Im mit flüssigem Stickstoff betriebenen und modular aufgebauten Tauch-Linearfroster[152] werden die Altmodule auf 70 K herunter gekühlt, wodurch an den Grenzflächen der einzelnen Materialien ob unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten Spannungskräfte entstehen. Die derart thermisch behandelten Altmodule werden im Anschluss einem Walzenbrecher

[152] Alternativ ist auch einen Bedünstung des Prozessinputs mit flüssigem Stickstoff denkbar.

zugeführt und auf Korngrößen von ≥ 2 mm zerkleinert. Bei diesem mechanischen Prozessschritt dienen die aus den materialspezifischen Wärmeausdehnungskoeffizienten resultierenden Spannungen an den Grenzflächen der einzelnen Materialien als Sollbruchstellen, sodass sich nach dem Walzenbrecher folgende Einzelfraktionen ergeben:

- Verbundfolien und weitere Kunststofffraktionen,
- Nichteisenmetalle (Aluminiumrahmung, Kupferverbinder),
- Glas und
- Siliziumsolarzellenbruch samt Zellenaufbau

Die getrennten Fraktionen werden mittels eines Kratzförderers einem Nichteisenmetallabscheider zugeführt. In diesem Arbeitsschritt werden dem Gesamtstoffstrom die Nichteisenmetalle entzogen. Dies betrifft beim Kryorecycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule die Bruchstücke des Aluminiumrahmens und der kupferhaltigen Zellenverbinder, welche anschließend in die gängigen Verfahren des entsprechenden Metallrecyclings gehen. Die verbleibenden Fraktionen gelangen über Förderbänder sodann in einen Säurewäscher. Im Säurewäscher werden mittels verdünnten mineralischen Säuren (Salpeter- oder Salzsäure) die metallischen Zellenaufbauten wie der vollflächige Aluminiumrückkontakt oder die Frontseitenmetallisierungen in Lösung gebracht. Zur Unterstützung beziehungsweise Beschleunigung des Prozesses erfolgt dies unter Zugabe eines Oxidationsmittels (Wasserstoffperoxid). Laut [Schultz *et al.* 2013] werden auf diese Weise freie naszierende Radikale erzeugt, welche letztlich eine sehr kurze Einwirkzeit effizieren. Zudem soll sonach auch keine Zufuhr von Prozessenergie notwendig sein, da der chemische Prozess bei Umgebungstemperatur abläuft. Das Lösungsmittel kann zur Anreicherung der gelösten Metalle dabei im Kreislauf geführt werden. Weiter wird an dieser Stelle ebenfalls die Notwendigkeit eines Abluftwäschers zur Neutralisation der überschüssigen Gase beschrieben. In besagtem Säurewäscher findet dementsprechend eine weitere stoffliche Trennung des gesamt in diesem Teilprozess aufgegebenen Materialstroms in gelöste Metalle aus dem metallischen Solarzellenaufbau sowie eine restliche Fraktion bestehend aus Glasbruch, Kunststoffen und Siliziumbruch statt. Die in der Säure angereicherte Metallfraktion kann anschließend, je nach Bedarf, mittels einer elektrolytischen Trennung und/oder einer chemischen Fällung vermarktungsfähig extrahiert werden. Im Falle der chemischen Fällung handelt es sich laut [Schultz *et al.* 2013] um eine ph-Wert gesteuerte Sulfid- oder Hydroxid-

fällung, der eine Kammerfilterpresse zum Abpressen der entstandenen Schlammfraktion nachgeschalten ist. Der anfallende Hydroxid- oder Sulfidschlamm kann anschließend ebenfalls vermarktet werden. Bei der elektrolytischen Trennung entstandene Reinmetalle sind hingegen direkt vermarktungsfähig. Die Stofffraktionen Glasbruch, Kunststoffe und Siliziumbruch werden dem Säurewäscher über einen Schneckenförderer mit Schwing- oder Vibrationstechnik (Erhöhung der Abtropfrate des Lösungsmittels) entzogen und einem weiteren Wäscher zugeführt. Dieser dient dem Entfernen restlicher Lösungsmittel mithilfe von Wasser. Dem Reinigungsprozess ist eine Dichteklassifizierungseinrichtung nachgeschalten, welche der abschließenden Fraktionstrennung dient.

Laut firmeneigenen Angaben können die in den kristallinen Siliziumsolaraltmodulen enthaltenen Metalle zu fast 100 % zurückgewonnen werden. Gleichwohl soll ein Höchstmaß an Reinheiten der Einzelfraktionen als Output erzielbar sein. Die Firma LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG hat am sächsischen Standort in Espenhain diesbezüglich umfangreiche Versuche im Labor und im Technikum durchgeführt. Der für das Jahr 2013 geplante Betrieb einer Pilotanlage wurde unterdessen auf unbestimmte Zeit verschoben – das Recyclingverfahren wird derzeit nicht betrieben. Grund ist nach [Kuehnle 2014] die Unwirtschaftlichkeit des Prozesses ob niedriger Rohstoffpreise, hoher Energiekosten und einem zu geringen Altmodulaufkommen. Im November 2012 bekam die LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG für diesen Kryorecyclingansatz den von der Zukunftsstiftung Südraum Leipzig verliehenen Zukunftspreis zugesprochen.

5.3.6 Recyclingansatz der Accurec Recycling GmbH

Obschon das Kerngeschäft der 1995 gegründeten Accurec Recycling GmbH in der Behandlung von NiCd- und Li-Ionen Batterien und der Rezyklierung der enthaltenen Wertstoffe liegt, wurde die eigens dafür entwickelte Verfahrenstechnologie der Vakuumdestillation auf das Recycling von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen angepasst – bisher zumindest im Maßstab einer Pilotanlage am Firmensitz in Mülheim. Für die Entwicklung und den erfolgreichen Betrieb dieses energiesparenden (Senkung des Energieeinsatzes zum Erreichen des Siedepunktes ob der Existenz eines Vakuums) und emissionsarmen Verfahrens erhielt das Unternehmen im November 2012 den Deutschen Rohstoffeffizienzpreis. Emissionsarm deshalb, weil die umweltkritischen Verdampfungsgase während des thermischen Vakuumprozesses hermetisch von den

restlichen Fraktionen abgetrennt werden können. Darüber hinaus wird nach [Kuehnle 2014] und firmeneigenen Angaben derzeit eine weitere Recyclinganlage am Standort Krefeld-Uerdingen installiert. Das zugrunde liegende Verfahrensprinzip findet sich in der nachstehenden Abbildung 5-22 wiederum grobschematisch dargestellt. Die Skizzierung der einzelnen Prozessabschnitte orientiert sich dabei an [Accurec Recycling GmbH 2013].

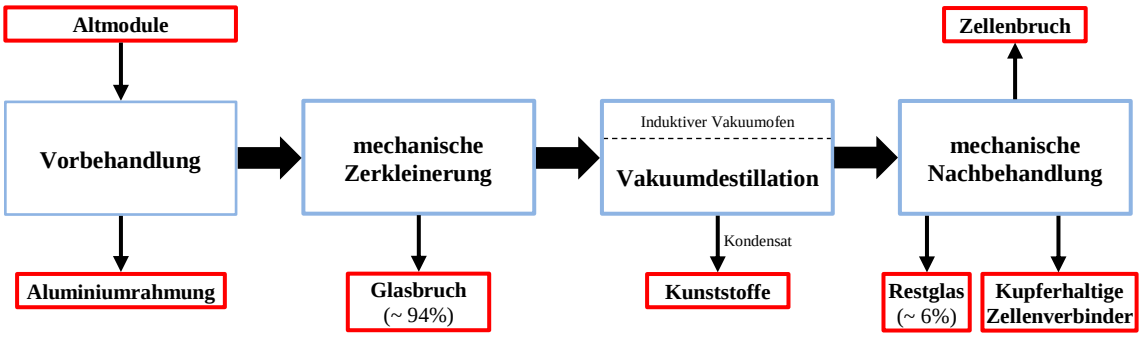


Abbildung 5-22: Grobschema des Recyclingverfahrens der Accurec Recycling GmbH.

In einem ersten Schritt werden die Modulanschlussdosen, sofern vorhanden, und die Modulrahmungen entfernt. Danach werden die Laminate mechanisch zerkleinert. Welche spezifische Technologie dabei zum Einsatz kommt, ist derweilen nicht bekannt. Allerding sollen bei diesem Schritt bereits circa 94 % des ursprünglichen Glasanteils aus dem weiter zu behandelnden Gesamtstrom ausgeschleust werden können. Leider sind an dieser Stelle ebenfalls keine Angaben zu Reinheitsgraden dieser separaten Outputfraktion öffentlich zugänglich. Wenngleich [Weyhe 2014, Folie 7] dessen Güte mit „premium glass“ angibt, ist aus Sicht des Autors weil der Diskussion um die vorangegangenen Recycling-technologien folgend davon auszugehen, dass die erzielbaren Reinheitsgrade unter jenen von pyrolytischen oder kryotechnischen Verfahren liegen.

Die übrigen Modulbestandteile werden im nächsten Schritt einem Induktions-pyrolyseofen zugeführt. Nachdem dieser auf einen Druck von 1 mbar evakuiert wurde erfolgt ein stufenweises aufheizen zur kontrollierten Verdampfung. Auf diese Weise werden die EVA-Bestandteile nachfolgend auskondensiert und so vom Stoffstrom getrennt. Übrig bleiben die Fraktionen Zellenbruch und kupferhaltige Zellenverbinder sowie ein kleiner Anteil Restglas, der im mechanischen Zerkleinerungsprozess nicht mit ausgeschleust wurde (circa 6 % des initialen Glasgehaltes eines kristallinen Siliziumsolar-altmoduls). Diese werden nach einer kurzen Abkühlphase einem weiteren mechanischen Behandlungsschritt unterzogen, wobei hierzu ebenfalls keinen genaueren Angaben ver-

öffentlich sind. Laut [Accurec Recycling GmbH 2013] können als Ergebnis die drei benannten Restfraktionen separiert werden. Ein abschließender Verfahrensschritt zur Erschließung der einzelnen Funktionsmaterialien aus dem Zellenaufbau und der Rückseitenkontaktierung ist indes nicht angedacht. In toto sind keine weiteren Einzelheiten zum Temperaturprofil, den mechanischen Zerkleinerungsprozess, der mechanischen Nachbehandlung sowie der Separierung der Einzelfraktionen bekannt.

5.3.7 Recyclingansatz der Saperatec GmbH

Wenngleich das von der in Bielefeld ansässigen Saperatec GmbH entwickelte Verfahren im Falle der Photovoltaiktechnologie lediglich die Trennung des Laminatverbundes von Dünnschichtmodulen auf Basis des Verbindungshalbleiters Cadmiumtellurid als Zielsetzung verfolgte, kann dieser technologische Ansatz dennoch einen Beitrag zum Recycling von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen liefern. Basis des Verfahrens bildet der Einsatz einer Trennflüssigkeit (Tenside nicht veröffentlichter Zusammensetzung) zur Solubilisation der photoaktiven Schicht. Hierbei werden die verschiedenen Ingredienzien nicht auf- sondern abgelöst. Im Falle von CdTe-Modulen soll sonach eine zerstörungsfreie Abtrennung des Superstrates und der Laminierung möglich sein, wobei der Verbindungshalbleiter als Suspension in der Trennflüssigkeit vorliegt. Für die kristalline Siliziumsolartechnologie kann dieser Ansatz zwar zur Abtrennung des Modulfrontglases vom Laminatverbund genutzt werden, die Auftrennung des Laminatverbundes selbst und damit einhergehend die Freilegung der Siliziumsolarzellen ist indes ob der dreidimensionalen Quervernetzung der beiden EVA-Schichten nicht möglich. Weiter müssten etwaige Altmodule vor der Tensidbehandlung zerkleinert werden, um der Trennflüssigkeit eine größere Angriffsfläche zu gewähren. Laut [Kernbaum und Hübner 2013] soll die Trennflüssigkeit mittels einer Filterpresse im Kreislauf gefahren werden können. Obschon der Saperatec GmbH im November 2011 der Deutsche Rohstoffeffizienzpreis für diesen technologischen Ansatz verliehen wurde, wird die Behandlung von Altmodulen jeglicher Art laut [Nageldiek 2016] ob einer sich im Jahr 2014 zugetragenen strategischen Neuausrichtung nicht weiter verfolgt.

5.3.8 Weitere Recyclingverfahren und -ansätze

Nebst den bereits beschriebenen Recyclingverfahren existiert noch eine Vielzahl weiterer Ansätze, welche im Nachstehenden teilweise diskutiert werden sollen. Aufgrund der großen Menge unterschiedlicher Ansätze erhebt dieses Unterkapitel keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Zudem zeigen einige, gleichwohl ob existente oder bereits als unbrauchbar angesehene Ansätze nur geringfügige weil auf einzelne Details beschränkte Abweichungen voneinander.

Ein anderes pyrolytisches Verfahren zu Trennung des Laminatverbundes geht auf die im April 2000 in Flabeg Solar International GmbH umbenannte und mittlerweile insolvent gemeldete Pilkington Solar International GmbH zurück. Das entwickelte Verfahren wurde unter der Nummer: EP 19980113527 zum Patent angemeldet und unter der Patentnummer: EP 0893250 A1 am 27. Januar 1999 veröffentlicht. Das Verfahrensprinzip beinhaltet eine Zufuhr der Altmodule in einen pyrolytischen Kammerofen unter Absenz einer Inertgasatmosphäre. Die Altmodule werden zuerst mit einer Aufheizrate von 10 °C je Minute auf eine Zieltemperatur von circa 500 °C erhitzt. Diese Temperatur wird für rund 40 Minuten gehalten. Daran schließt sich eine kontrollierte zweiteilige Abkühlphase an. Die Abkühlrate beträgt dabei ausschließlich 5 °C je Minute bei einer fünfminütigen Haltephase bei 120 °C. Während der Pyrolyse werden die Kunststoffanteile vollständig verbrannt. Alternativ ist auch die kontrollierte Zugabe eines Oxidationsmittels angedacht. Infolge der Verbrennung der Kunststoffanteile, besonders aufgrund des EVA-Anteils, ist einen Abgasreinigung nachzuschalten. Die Gesamtdauer des Pyrolysevorgangs liegt bei circa 4 Stunden. Nähere Informationen zum Temperaturprofil, dem Reaktionsumsatz und dem Partialdruck eines möglichen Oxidationsmittels sind der Patentschrift zu entnehmen. Laut [Fthenakis und Moskowitz 1999] führt diese Verfahrensweise zur Oxidation der silberhaltigen Frontkontakte, was eine Rückgewinnung funktionstüchtiger Zellen ausschließt. Wenngleich rund 60 % der Wafer für einen Neuprozessierung zu Solarzellen gewonnen werden konnten, stellt dies jedoch kein primäres Verfahrensziel dar. Nach [Sander et al. 2004] standen vielmehr die Rückgewinnung des Glases und dessen Zufuhr zum Verbundglasrecycling sowie die Rezyklierung der Modulrahmungen im Fokus. Dieses Verfahren mit den spezifischen Prozessparametern wird nicht betrieben.

Zwei weitere Ansätze entstammen der Beteiligung von BP Solar. Zum einen erprobte BP Solar ein Verfahren zur Zersetzung der EVA-Schichten mittels Mineralsäuren. Dieser Ansatz ist jedoch nur unter gewissen Rahmenbedingungen und für mittlerweile marktunübliche Zusammensetzungen des Laminates und der Rückseitenfolien geeignet und wird daher ebenfalls nicht betrieben.

Zum anderen wurde in Zusammenarbeit mit den belgischen Firmen Soltech und Seghers im Rahmen eines EU geförderten „Brite Euram Projektes“ (Projektnummer: BRPR - CT98 - 0750) ein Verfahren zur Verwertung von kristallinen Siliziumsolar-altmodulen auf Basis einer Wirbelschichtfeuerung entwickelt. Die Wirbelschicht besteht aus Sand einer Partikelgröße von 100 µm, der in einem heiß brodelnden und flüssig-keitsähnlichen Zustand mit einer Geschwindigkeit von rund einem Zentimeter je Sekunde im Ofeninnenraum verwirbelt wird. Die Altmodule werden zur Behandlung in eine Einrichtung eingespannt, welche je nach Modultyp anzupassen ist. Die Prozesstemperatur beträgt 450 °C bei einer Behandlungsdauer von 45 Minuten. Zudem gibt [Frisson *et al.* 2000] an, dass die Altmodule möglichst in einem 60 ° Winkel einzuspannen sind. Unterstützt durch die physikalischen Gegebenheiten eines Wirbelbettes vergasen die Kunststoffanteile der kristallinen Siliziumsolaraltmodule während des thermischen Prozesses. Zudem bietet die Behandlung mittels einer Wirbelschicht die Vorteile eines intensiven Kontaktes, einer idealen Durchmischung sowie in besonderer Weise ein über den gesamten Reaktorraum konstantes Temperaturprofil. [Sander *et al.* 2004] Dement-gegen ist laut [Sander *et al.* 2007] der thermische Prozess unter Inertgasatmosphäre (beispielsweise Stickstoff) zu betreiben, da der Zellenbruch in Gegenwart von Luft oder sauerstoffhaltiger Umgebung aufgrund der exothermischen Reaktionen der Kunst-stoffe stark ansteigt. Die aus der Vergasung der Kunststoffanteile resultierenden Abgase verlassen den Reaktorraum über ein Flammenschild. In dieser Nachverbrennungszone werden die Abgasbestandteile zersetzt, wobei gleichzeitig die dabei entstehende Wärme dem Reaktor wieder zugeführt wird. Laut [Frisson *et al.* 2000] konnten auf diese Weise eine Wiedergewinnung des Glases von 100 % und der Solarzellen von 80 % erzielt werden, wenngleich die freigelegten Solarzellen wie bei den vorab beschriebenen ther-mischen Prozessen einem zusätzlichen chemischen Behandlungsschritt zur Rückätzung des Zellenaufbaus und der aluminiumhaltigen Rückseitenkontaktierung unterzogen werden müssen. Diese Nachbehandlung umfasst einen ersten Ätzschritt mittels 15 %-iger Flusssäure, gefolgt von Ätzlösungen aus verdünnter Schwefelsäure (Verhältnis 4:1) und

einer 40 %-igen Salpetersäure; beide letztgenannten Ätzschritte jeweils bei einer Prozesstemperatur von 80 °C. Abschließend ist der Wafer noch mit einer 20 %-igen Natronlauge zu behandeln. Die recycelten Wafer sind in ihren Eigenschaften nahezu identisch mit ihren neu produzierten Pendants. Das Verfahren wird allerdings ingleichen nicht betrieben, da es sich nicht für den Umgang mit kristallinen Siliziumsolarmodulen marktüblicher Abmaße eignet und bei der Behandlung im Wirbelbettofen hohe Staubwerte auftreten, welche aufgrund der dafür erforderlichen speziellen Staubabscheidung hohe Kosten verursacht. [Sander *et al.* 2004]

Ein weiterer Ansatz zur Auftrennung des Modulverbundes ist der sogenannte CELLSEPA-Prozess. Hierbei werden aus Zitrusfrüchten gewonnene Limonen zur Quellung des EVA und letztlich zur Ablösung vom Frontglas genutzt. Infolge der Quellung sind die Solarzellen erheblichen mechanischen Kräften ausgesetzt, weshalb sich dieses Verfahren nicht zur Rückgewinnung ganzer Wafer eignet. Gleichwohl sind prozessbedingt hohe Auslagerungszeiten notwendig.

Ein vollkommen anderes Konzept wurde bereits 1995 von der Siemens Solar GmbH unter der Nummer: DE 1995139699 patentiert. Ziel ist die Freilegung möglichst intakter kristallinen Siliziumsolarzellen und/oder des Frontglases mittels eines Wasserstrahls. Die nachfolgenden Erläuterungen des Verfahrens orientieren sich sämtlich an der entsprechenden Patentschrift. Nach der Entfernung des Modulrahmens ist je nach Verfahrensziel eine Laminatschicht von der anderen, beziehungsweise der gesamte Laminatverbund vom Glas auf einer Gesamtfläche von wenigen Quadratzentimetern anzuheben. Dieser Spalt dient als erste Angriffsfläche eines aus einer quasirechteckigen Düse mit einem Durchmesser von 2 mm austretenden Wasserstrahls unter einem maximalen Öffnungswinkel von 20 ° bei einem Druck von 300 bar. Der Wasserstrahl sollte dabei einen Angriffswinkel von 30 ° bei einer Entfernung von 1 cm zur zu behandelnden Oberfläche aufweisen. Bei der Wahl dieser Parameter soll der Patentschrift nach ein Freilegen der Solarzellen ohne deren Beschädigung möglich sein. Zur Freilegung des Frontglases kann der Wasserdruck entsprechend erhöht werden. Bei Fortschreiten des Prozesses ist darauf zu achten, das Abstand und Auftreffwinkel gleich bleiben; die Düse oder das Modul sind adäquat nachzuführen – auch entlang der Angriffsfläche. Die entfernte Laminatschicht muss nachfolgend entsorgt oder anderweitigen Behandlungsschritten zugeführt werden. Im Falle freigelegter Solarzellen sind die Frontseitenmetallisierung und der vollflächige Aluminiumrückkontakt ebenfalls in

weiterführenden Behandlungsschritten (beispielshalber mittels der bereits oft erwähnten Abfolge chemischer Ätzschritte) zu entfernen. Dieser Recyclingansatz wurde nie in einer Pilotanlage oder großtechnisch betrieben und findet auch derzeit keine Anwendung. Aus Sicht des Autors wäre dieses Verfahren bei heutigen Zellendicken nicht zu deren zerstörungsfreien Rückgewinnung geeignet.

Letztlich stellt noch die Zugabe kristalliner Siliziumsolaraltmodule zur Ferrosiliziumherstellung eine Möglichkeit der Weiterverwertung dar. Wenngleich nach [Goetzberger und Hoffmann 2010, Seite 143] bei dieser Handhabe keine Vorsortierung und keine vorangegangene Separierung der Modulkomponenten notwendig ist, sollten zumindest geschraubte Aluminiumrahmungen vorab entfernt und dem dafür spezifischen Kreislauf zugeführt werden. Dieses Vorgehen wurde bereits im Jahr 1995 wiederum von der Siemens Solar GmbH unter der Nummer: DE 1995141074 patentiert. Dabei wird schon in der Patentschrift auf die Sinnhaftigkeit der vorausgehenden Modulentrahmung (geschraubt) hingewiesen. Die entsprechenden Laminate sind anschließend zu Shreddern und zu Zermahlen, sodass sich ein feinkörniges Granulat ergibt. Dieses Granulat kann direkt der Ferrosiliziumherstellung beigefügt werden, welches schließlich als Zuschlag bei der Stahlherstellung Anwendung findet. Dieses Verfahren ist in Summe aus Sicht des Autors nicht zielführend, da zwar eine Deponierung oder eine Mitverbrennung vermieden wird, die Konsequenz jedoch ein extremes Downcycling darstellt. Gleichwohl werden zum einen die Funktionsmaterialien nicht rezykliert, zum anderen kann dadurch nicht die energieintensive Siliziumraffination umgangen werden.

Abschließend sollen noch vier aktuelle Forschungsprojekte diskutiert werden, die sich mit verschiedenen Aspekten der Optimierung bestehender und in den vorangegangenen Unterkapiteln beschriebener Recyclingtechnologien für kristallinen Siliziumsolaraltmodule befassen oder alternative Absätze aufzeigen:

- FRELP (Full Recovery End-of-Life Photovoltaic),
- PV MOREDE (Photovoltaic Panels Mobile Recycling Device),
- Cu-PV (Cradle-to-Cradle sustainable PV modules) und
- CABRISS (Implementation of a CirculAr economy Based on Recycled, reused and recovered Indium, Silicon and Silver materials for photovoltaic and other applications).

Das FRELP-Projekt legt den Fokus auf die Verknüpfung innovativer Recyclingansätze, die zusammen eine Recyclingrate von 100 % bei gleichzeitiger Reduzierung des gesamten Energieaufwandes und der Erzeugung von 98 % verkaufsfähiger Produkte aus dem Recyclingprozess (bezogen auf das Modulgesamtgewicht) ermöglichen sollen. Das Vorhaben ist ein im Rahmen des LIFE-Programms von der Europäischen Kommission gefördertes Projekt (Referenznummer: LIFE12 ENV/IT/000904) unter Beteiligung von Sasil S.p.A., PV Cycle und Stazione Sperimentale del Vetro (SSV). Besonderer Fokus liegt dabei auf der ökonomischen Tragfähigkeit des Prozesses. Gleichwohl soll die (Weiter)-Entwicklung eines Prozesses zur bisher technisch schwierigen Delaminierung kristalliner Siliziumsolaraltmodule inklusive der zerstörungsfreien Rückgewinnung der integrierten Solarzellen im Vordergrund stehen. [FRELP 2014] Der Start einer auf den Ergebnissen des Projektes arbeitenden Pilotanlage ist für das Jahr 2017 geplant.

PV MOREDE ist ein von der Europäischen Kommission unterstütztes Verbundprojekt der Partner: La Mia Energia SCARL, der Universität Florenz, PV Cycle und LEITAT - Technological Center mit dem Ziel eine universell einsetzbare mobile Recyclinganlage für alle Altmodulspezifikationen am Markt zu etablieren. Die modulare Recyclinganlage ist in einem transportablen Kontainer untergebracht, sodass Altmodule an der Stelle des Anfalls oder in dessen Nähe quasistationär beziehungsweise mobil behandelt werden können. Dabei kommt ein bisher nicht näher ausgeführter mechanischer Prozess zur Anwendung, der neben einem Schneide- und Zerkleinerungsschritt auch eine Sortierung der Outputfraktionen vorsieht. Derweil steht nicht die Feinauftrennung der Funktionsmaterialien im Vordergrund, der Fokus liegt vielmehr laut [La Mia Energia SCARL 2015a] auf einer umweltfreundlichen weil unter Absenz von thermischen und chemischen Prozessen ablaufenden Separierung der Glasfraktion (in vordefinierten Partikelgrößen), der gesamten metallischen Ingredienzien und der Kunststoffanteile sowie im Vergleich zu den üblichen stationären Behandlungsanlagen einer kostengünstigeren Betriebsführung. Die Reduzierung der Kosten soll auf die einfache Verfahrenstechnik und vor allem auf die Senkung von Transportkosten zurückgehen. Allerdings sind weder etwaige zu erwartende Kostenstrukturen noch sonstige Ausführungen zu den Outputfraktionen wie beispielshalber die generierbare Reinheit und Qualität zugänglich beziehungsweise bekannt. Weitere Vorteile sollen die Möglichkeit zur profitablen Behandlung kleiner Mengen an Altmodulen sein, geringe Anlageninvestitionskosten und die Nähe zum Entstehungsort der Altmodule bei gleichzeitiger

Nähe zu etwaigen Weiterverwertern des generierten Outputs ob der örtlichen Flexibilität. Gleichwohl können auch geringe Mengen an Altmodulen „on demand“ und ohne Zwischenlagerung behandelt werden. Zu den weiteren Stärken dieses Ansatzes zählen laut [La Mia Energia SCARL 2015b] zudem reduzierte Stückkosten für das Recycling kleiner Altmodulmengen als auch eine geringe Umweltbelastung (neben der emissionsgeringen Verfahrensweise selbst) ob eingesparter Transportwege.

Im Cu-PV-Projekt wird an verschiedenen Stellen des gesamten Lebenszykluses eines kristallinen Siliziumsolarmoduls angesetzt, wobei der Fokus jeweils auf der Reduzierung von Umweltauswirkungen liegt. Ein Ziel stellt die Entwicklung sehr dünner (≤ 120 µm) Hocheffizienzzellen in Form von beispielshalber Rückkontaktsolarzellen dar, was mit einer Minderung des Energie- und Ressourceneinsatzes bei der Produktion von kristallinen Siliziumsolarmodulen einhergeht. Ein weiteres Ziel ist die Reduktion des Einsatzes von Blei und insbesondere von Silber während des Fertigungsprozesses eines kristallinen Siliziumsolarmoduls mittels angepasster Kontaktierungsprozesse. Zudem werden einzelnen Aspekte eines recyclingorientierten Moduldesigns untersucht. [Geerligs 2015] Im Sinne des Kapitels wird an dieser Stelle nicht näher auf die genannten Zielstellungen und darauf basierende Lösungsansätze eingegangen; es wird auf das Kapitel 5.5: „Konstruktionsbedingte Beeinflussungen der ökonomischen Aspekte“ samt der zugehörigen Unterkapitel verwiesen. Das Cu-PV-Projekt wird von der Europäischen Kommission gestützt und umfasst die Projektpartner IMEC (Interuniversity Microelectronics Centre), Meco Equipment Engineers BV, Technical Plating Sociedad Limitada, Eurotron BV und PV Cycle.

CABRISS ist ein im Rahmen des Horizon 2020 von der Europäischen Kommission unterstütztes Verbundprojekt (Vereinbarungsnummer: 641972). Neben CEA (French Alternative Energies and Atomic Energy Commission) als Projektkoordinator sind insgesamt weitere 15 Partner aus 9 Ländern aktiv. Die Loser Chemie GmbH und das Fraunhofer THM (Technologiezentrum Halbleitermaterialien) stellen die deutschen Projektpartner. Zudem beteiligen sich auch PV Cycle und die Universität Wien am Projekt. CABRISS zielt darauf ab, eine Kreislaufwirtschaft zu etablieren, die die anstehenden hohen Mengen von Altmodulen bewältigen sowie positive Effekt für andere Industriezweige wie die Metallurgie, die Elektro- und die Glasindustrie daraus generieren kann. Darunter fallen die Suche nach möglichen Absatzmärkten der aus dem Recycling von Photovoltaikmodulen generierbaren Sekundärrohstoffe, das Erreichen von 90 %-igen

Recyclingquoten und eine Steigerung der europaweiten Sammelquoten auf ebenfalls über 90 %. Dafür werden nicht nur neue Recyclingtechnologien entwickelt, es sollen auch bereits erfolgreich getestete Ansätze weiterentwickelt und sinnvoll verknüpft werden. Hierbei sind Symbiosen mit den bereits benannten Industriezweigen angedacht, besonders was die Anforderungen an die Qualitätsstandards der etwaigen Sekundärrohstoffe betrifft. Gleichwohl sind die einzelnen Prozesse des Gesamtrecyclingverfahrens dahingehend zu optimieren, dass etwaiger Prozessoutput direkt wieder in der Produktion von Photovoltaikmodulen Einsatz finden kann. Es wird folglich versucht sowohl die internen als auch die externen Absatzmärkte mit einzubinden; oder anders ausgedrückt, Wieder- und Weiterverwertung zu betrachten. Ob Wieder- oder Weiterverwendung der Altmodule Beachtung findet, ist vom zugrunde liegenden Recyclingprozess abhängig. Hierzu sind jedoch durch die bisher nur kurze Projektlaufzeit keine Details bekannt, beziehungsweise Konkretisierungen getroffen wurden. Allerdings scheinen sich erste Arbeiten auf die Wiederverwertung von kristallinem Siliziumsolarzellenbruch zu konzentrieren und mögliche ökologisch und teilweise auch ökonomisch positiven Effekte, die mit einer Wiederverwendung einhergehen, keine Beachtung zu finden.

5.3.9 Zusammenfassende Betrachtungen der Recyclingverfahren und -ansätze

Aus der vorangegangenen Diskussion der einzelnen Recyclingtechnologien und -ansätze wird deutlich, dass zwar eine Vielzahl unterschiedlicher Prinzipien für den technisch schwierigen Prozess der Laminatauftrennung zur Verfügung stehen, größtenteils jedoch thermische Verfahren Einsatz finden. Dabei ist wiederum nach Art des spezifischen Verfahrens zu unterscheiden. Die Laminatauftrennung von der SolarWorld AG, Park *et al.* 2016 und der Pilkington Solar International GmbH basieren beispielshalber auf pyrothermischen Verfahren; das Verfahren der BP Solar (Brite Euram Projekt) nutzt eine Wirbelschichtfeuerung; die Accurec Recycling GmbH eine Vakuumdestillation und Lobbe Industrieservice GmbH & Co. KG einen quasithermischen Ansatz bestehend aus einem thermischen und einem mechanischen Prozess (kryogene Verbundmaterialtrennung). Chemische Ansätze wie von der Saperatec GmbH, von BP Solar (Einsatz von Mineralsäuren) und das CELLSEPA-Verfahren scheinen nicht oder nur bedingt zur Laminatauftrennung geeignet zu sein. Daneben gibt es auch ein paar wenige Bestre-

bungen den Modulverbund ohne Beschädigung der Solarzellen mechanisch aufzutrennen, wie zum Beispiel beim Ansatz der Siemens Solar GmbH mittels eines Hochdruckwasserstrahls. Je nachdem, ob ein thermisches, chemisches, mechanisches oder ob eine Kombination der einzelnen Verfahren zur Auftrennung des Laminatverbundes Anwendung findet, ergeben sich für die entsprechenden Recyclingansätze unterschiedliche Vor- und Nachteile. Diese sind in der Tabelle 5-11 auf nachfolgender Seite in verallgemeinerter Form und geordnet nach Verfahrensprinzip zur Laminatauftrennung gegenübergestellt.

Obschon die Rauchgasentwicklung und die damit einhergehende Notwendigkeit des Betriebes einer Sekundärmaßnahme bei den pyrothermischen Verfahren besonders ob der Vergasung des fluorhaltigen Tedlar einen Nachteil weil verbunden mit zusätzliche Kosten darstellt, sind in der Gesamtheit der verfahrensspezifischen Vor- und Nachteile laut [Wang *et al.* 2012] und [Radziemska *et al.* 2010] die thermischen Ansätze zur Laminatauftrennung zu präferieren. Sonach scheinen sich bezüglich der chemischen Pendants deren hoher Chemikalienverbrauch in Verbindung mit dem hohen Aufkommen von gebrauchten und zu entsorgenden Chemikalien, den sich daraus ergebenden Kosten sowie die bisweilen nur geringen Durchsatzraten entsprechend stark negativ auszuwirken.

Dementgegen ist für eine vollständige Auftrennung der einzelnen Fraktionen eines kristallinen Siliziumsolaraltmoduls eine Kombination mehrerer Verfahrenstypen notwendig. So wird bei einer gewünschten Wiederverwendung der Wafer und Rückgewinnung der Funktionsmaterialien unabhängig der Wahl eines zum Status quo alternativen Ansatzes der Laminatauftrennung ein sich entweder direkt anschließender oder finaler chemischer Ätzprozess unabdingbar. Dies trifft auch bei einer gewünschten Wiederverwertung des Siliziums zu, mit Ausnahme des beschriebenen Recyclingansatzes nach [Park *et al.* 2016]. Die Substitution der Teilschritte zur Entmetallisierung der Solarzellen und zur Abtrennung des pn-Übergangs sowie der Antireflexionsschicht durch einen mechanischen Schleifprozess ist für eine Wiederverwertung des Siliziums ausreichend, nicht jedoch zur direkten Wiederverwendung der Wafer ob der gestörten Oberflächen.

Tabelle 5-11: Stärken und Schwächen der grundlegenden Verfahrensansätze zur Delaminierung kristalliner Siliziumsolaraltmodule.

		Stärke	Schwäche
Verfahren	**Thermisch**	- Keine Abtrennung der Aluminium-rahmung im Vorfeld notwendig - Keine Zerkleinerung der Module notwendig und damit Rück-gewinnung unbeschädigter Zellen (zur weiteren Aufbereitung), des Glases und der Rahmung zur Wiederverwendung oder -verwertung möglich - Teilweise unabhängig von verschiedenen Modulmerkmalen - Vergleichsweise unkompliziertes Verfahren - Hohe Durchsätze erzielbar	- Emissionen und Notwendigkeit einer Abgasbehandlung (abhängig von stofflicher Zusammensetzung der Altmodule) - Entsorgung von Abfällen aus Rauchgasreinigung und von Verbrennungsrückständen - Bei Wirbelschichtfeuerung Entsorgung des kontaminierten Sandes und Staubentwicklung - Energiebedarf
	Chemisch	- Teilweise Rückgewinnung unbeschädigter Wafer, des Glases und der Rahmung zur Wiederverwendung oder -verwertung möglich	- Hoher Chemikalienverbrauch - Entsorgung der gebrauchten Chemikalien - Anpassung der eingesetzten Lösungen an stoffliche Zusammensetzung der Module notwendig - Behandlung von Abgasen und Abwässern - Hohe Behandlungsdauern zur Laminatauftrennung notwendig - Vorausgehende Abtrennung der Modulrahmung - Zerkleinerung der Module förderlich
	Mechanisch	- Kein Einsatz von Chemikalien notwendig - Keine Rauchgasreinigung	- Vorausgehende Abtrennung der Modulrahmung - Entsprechende Vorbehandlung der Module notwendig - Rückgewinnung unbeschädigter Wafer, des Glases und der Rahmung zur Wiederverwendung oder -verwertung nur beschränkt möglich
	Status quo	- Keine Nebenprodukte zur Entsorgung - Simple Verfahrensweise	- Downcycling - Keine Auftrennung und Rückgewinnung der Funktionsmaterialien möglich

Sonach werden bezüglich der möglichen Form des generierbaren Outputs der Recyclingverfahren und dessen nachträglichen Nutzungsmöglichkeiten weitere Vor- und Nachteile der einzelnen technischen Ansätze zur Laminatauftrennung deutlich. Dies zielt in besonderem Maße auf die Zerkleinerung der Altmodule ab. Sowohl beim Status quo der Behandlung von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen als auch bei mechanischen Prozessen zur Laminatauftrennung (hierunter fallen auch chemische Prozesse, denen zur Steigerung der Effizienz ein mechanischer Zerkleinerungsprozess vorgeschalten ist) schließt die Modulzerkleinerung eine Wieder- oder Weiterverwendung des Glases, der

Modulrahmung, der Laminatverbundstoffe, des Siliziums und der weiteren Funktionsmaterialien von vornherein aus. Im Falle der pyrothermischen Laminatauftrennung und einer anschließenden chemischen Behandlung der freigelegten Solarzellen sowie einer Reinigung des Glases kann im besten Fall eine direkte Wieder- oder Weiterverwendung des Frontglases, der Modulrahmung sowie eine Wiederverwendung der kristallinen Siliziumrohwafer (als Premiumprodukt sogar Wafer der Spezifikation „p-dotierter, texturierter, kristalliner Siliziumwafer“) erfolgen. Die weiteren Funktionsmaterialien können einer Wieder- oder Weiterverwertung zugeführt werden und die Laminatkunststoffe letztlich einer Weiterverwertung im Sinne der Wärmeerzeugung. Die unterschiedlichen Rückgewinnungsformen des Outputs der jeweiligen Recyclingprozesse können an verschiedenen Punkten bei einer beispielshalber brancheninternen Rezyklierung als Prozessinput fungieren und sonach auch abweichende Effekte auf die Produktionsbilanz kristalliner Siliziumsolarmodule zeitigen.

Allerdings ist die Generierung wieder- oder weiterverwendbaren Outputs nicht alleinig vom zugrunde liegenden Verfahrensschritt abhängig. Ein Altmodulrecyclingverfahren, welches auf die Wiederverwendung der aus den Solarzellen gewonnenen kristallinen Siliziumrohwafer abzielt, kann bei beschädigten Altmodulen als Input keine unbeschadeten Siliziumrohwafer zurückgewinnen. Die Qualität des Outputs der Recyclingprozesse kann demnach an die Güte des Inputs gebunden sein, sofern dies für den Output ein Merkmal darstellt. Werden beispielshalber zerborstene Altmodule oder Altmodule mit beschädigten Solarzellen in den Recyclingprozess eingebracht, kann bei konsequenter Anwendung der Nomenklatur in keinem Fall eine Verwendung jeglicher Art der Zellen oder Wafer erzielt werden; unabhängig vom genutzten Verfahrensprinzip. Dementgegen sind Recyclingverfahren, die lediglich auf eine Verwertung der Module und deren Ingredienzien abzielen, unabhängig vom qualitativen Zustand der Altmodule. Dies gilt in besonderem Maße für Recyclingverfahren, die einen mechanischen Zerkleinerungsprozess am Anfang der Recyclingsequenz nutzen. Eine große Abhängigkeit von der Qualität und dem Zustand der Altmodule zeigen der Diskussion folgend indessen die Recyclingansätze, die eine Verwendung der Materialien anstreben. Die Beschaffenheit des Prozessinputs der Recyclingverfahren in Form kristalliner Siliziumsolaraltmodule wird dabei von vielen Faktoren bestimmt. Neben der spezifischen Defektursache, welche teils erheblichen Einfluss auf die Qualität der Altmodule besitzen kann, sind mitunter besonders bei der Demontage, dem Transport, der Lagerung und dem Handling der

Altmodule Qualitätseinbußen zu verzeichnen. So kann eine unsachgemäße Demontage die Module beschädigen[153]. Gleichwohl beinhaltet auch der Transport zum Sammelhof, zur Übergabestelle und zur Recyclinganlage in Verbindung mit einer falschen Lagerung der Altmodule ein enormes Risiko der Qualitätsverschlechterung. Dies zeigt sich besonders flagrant bei der Wahl der Transportbehältnisse und der Durchführung deren Be- und Entladeprozesse. Gegenwärtig erfolgen die (Zwischen-)Lagerung und der Rücktransport mittels herkömmlichen Gitterboxen und Containern, die zum weiteren Verbleib der Altmodule teilweise im Kippvorgang in einer Mulde entleert werden. [Fischer *et al.* 2012] Dementsprechend ist von einer enormen qualitativen Verschlechterung des Zustandes der Altmodule zwischen Demontage und Zugabe in einen Recyclingprozess auszugehen. Der vorangegangenen Diskussion folgend, stellt dies jedoch für den Status quo der Altmodulverwertung keine Problematik dar – abgesehen vom Arbeitsschutz (Glasscherben, scharfe Bruchkanten et cetera) und etwaigen Umweltproblemen durch Auslaugung von Dünnschichtmodulen. Auch die Verpackung und der Rücktransport in Pappkisten (analog der Transportverpackung von Neumodulen zur Installationsstädte) ist für einen möglichst schadfreien Lager- und Rücktransportprozess nicht geeignet weil witterungsunbeständig und nicht für Module verschiedener Dimensionen ausgelegt. Besonders letzteres Kriterium stellt eine enorme Hürde an das Design adäquater Transportbehälter dar, da an Sammelstellen eine Vielzahl unterschiedlicher Module verschiedenster Hersteller anfallen. Dementgegen kann diese Art der Transportverpackung jedoch für Demontagen großer Solarparks geeignet sein. [Fischer *et al.* 2012] gibt eine weitere Möglichkeit der Transportverpackung an: Stapelung der Altmodule auf Europaletten und Sicherung mittels Spannband. Diese Handhabe ist indessen ebenfalls nur bedingt geeignet. Zum einen müssten die Module vorab nach Größe geordnet werden, da sonst das Eigengewicht der Module in Verbindung mit der hervorstehenden Modulrahmung darunter liegende Altmodule beschädigen kann. Zum anderen müssten Altmodule gleicher Größe auch genau übereinander gestapelt, die Abmessung der Palette an die jeweiligen Abmaße des Altmodulbatches angepasst und die Spannbänder entsprechend angelegt werden. Laut [Pohl *et al.* 2010] und [Kummer 2011] sollen geschlossene Kunststoffsammelboxen, wie sie von PV Cycle angeboten werden, am besten die Kriterien an eine qualitativ hochwertige Rückführung von Altmodulen erfüllen können. Den beiden vorbenannten Quellen nach zählen hierzu vor allem die Transport-

[153] Begreift beispielshalber ein Betreten von noch installierten Modulen zur Demontage anderer Module, mechanische Krafteinwirkung infolge eines Sturzes der Altmodule oder nicht fachgerechtes Handling der deinstallierten Altmodule mit ein.

und Bruchsicherheit, die Aufnahme etwaigen Glasbruchs, eine Austauschbarkeit, Witterungsbeständigkeit und die Möglichkeit der Aufnahme von Altmodulen verschiedener Größen. Neben der Wahl eines geeigneten Transportbehälters sind natürlich auch dessen Be- und Entladevorgänge für den Qualitätserhalt der Altmodule ausschlaggebend. Eine diesbezüglich häufig anzutreffende Fehlerquelle ist der händische Transport sowie die Stapelung von Altmodulen von nur einer Person, was einen starken mechanischen Stress zeitigen kann.

Den bisherigen Ausführungen folgend, lassen sich sonach aus rein technologischer Sicht drei idealisierte Fälle zur weiteren Diskussion konstruieren:

- Recycling zur Verwendung: Einsatz eines Recyclingverfahrens zur möglichst vollständigen Wieder- und/oder Weiterverwendung aller Hauptkomponenten eines kristallinen Siliziumsolaraltmoduls (Frontglas, Modulrahmung und Siliziumwafer) inklusive einer Aufschlüsselung der einzelnen Funktionsmaterialien und deren Verwertung. Voraussetzung bildet eine der Beschaffenheit nach optimale Inputqualität. Denkbar ist das Verfahren der SolarWorld AG (Kapitel 5.3.2) und in Teilen der Ansatz nach Park *et al.* 2016 (Kapitel 5.3.3).
- Recycling zur Verwertung: Sämtliche Altmodulkomponenten werden im Rahmen des Recyclingprozesses verwertet. Dies betrifft vor allem die Hauptkomponenten wie das Frontglas, die Modulrahmung und die Solarzellen. Die Solarzellen, als spezielles Bezugsobjekt, sind Gegenstand einer Wiederverwertung und werden letztlich in die SGS-Schmelze als hochreines SGS rückgeführt. Die Inputqualität ist nicht von Bedeutung. Derartige Verfahrensansätze bilden LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG (Kapitel 5.3.5) und CABRISS (Kapitel 5.3.8).
- Status quo: Downcycling nach Kapitel 5.3.1, wobei dem Zustand des Prozessinputs wiederum keine Bedeutung zukommt.

Im Falle des Recyclings zur Verwendung der Hauptkomponenten eines Altmoduls wird für die nachfolgenden Angaben, Betrachtungen und Diskussionen vorerst unterstellt, dass es sich in erster Linie um eine Wiederverwendung handelt. Die weiteren Funktionsmaterialien beispielshalber aus dem Zellenaufbau sollen wiederverwertet und die Verbundkunststoffe weiterverwertet werden. Bei dieser Fallbetrachtung wird aus technischer Sicht das Recyclingverfahren der SolarWorld AG, wie im Kapitel 5.3.2 beschrieben, zugrunde gelegt. Das in den Altmodulen enthaltene Silizium soll demnach direkt als neuwertiger Wafer infolge einer Wiederverwendung aus dem Recyclingprozess

hervorgehen. Obschon die tatsächlich benötigten Stoffströme und Energien der potenziell für diesen Fall in Frage kommenden Recyclingverfahren entweder unbekannt, öffentlich nicht zugänglich oder als Betriebsgeheimnis eingestuft sind, kann jedoch auf Basis der bisher gewonnenen Erkenntnisse auch aus den Kapiteln zur Produktion eines $gSSM_{sc/mc}$ ein maximal mögliches Einsparpotenzial gegenüber einer reinen Neuproduktion identifiziert werden. Grundlage hierfür bildet die Tabelle 4-25 auf Seite 281f zusammen mit der Diskussion rund um das Kapitel 4.5.6. Wird beispielshalber zudem unterstellt, dass alle aus dem Recyclingprozess wiederverwendbaren Erzeugnishauptstoffe (Frontscheibenglas, Aluminiumrahmung und die kristallinen Siliziumrohwafer) in ausreichender Menge und qualitativ zulänglich zur totalen Substitution ihrer neuproduzierten Pendants vorhanden sind, ergibt sich das in nachstehender Tabelle 5-12 angegebene idealisierte maximale Einsparpotenzial. Das Layout der Tabelle ist im Sinne der vereinfachten Vergleichbarkeit an das der Tabelle 4-25 angelehnt.

Zuvörderst ist zu beachten, dass die Tabelle 5-12 nur die Repetierfaktoren, Energien und Siliziumsurrogate aufführt, die ob der Wiederverwendung der recycelten Erzeugnishauptstoffe tatsächlich eine quantitative Änderung erfahren würden; alle gleichbleibenden Werte sind nicht enthalten. Da die im Recyclingverfahren gewonnenen Wafer in der Produktion kristalliner Siliziumsolarzellen wiederverwendet werden, würde das Recyclingverfahren selbst folglich die Neuproduktion von Wafern inklusive der gesamten vorgelagerten Fertigungsstufen nach der in Anhang 4-11 dargestellten Produktionssequenz substituieren. Ergo entfielen zum einen alle Einzelbeiträge von Repetierfaktoren auf den Fertigungsstufen mit dem Stufenindikator eins bis vier. Erreicht das in Tabelle 5-12 angegebene prozentuale Einsparpotenzial 100 %, wurde der entsprechende Repetierfaktor bei der reinen Neuproduktion sonach nur vor der Solarzellenproduktion eingesetzt. Dies zeigt sich in besonders einfach greifbarer Weise am Beispiel der Siliziumsurrogate.

Zum anderen würde sich die energieintensive Siliziumraffination sowie die Anpassung der Kristallqualität erübrigen, was sich an dem hohen Maß der eingesparten Energie widerspiegelt. Darüber hinaus würde der verlustreiche Prozess der Wafervereinzelung entfallen, was einen zusätzlichen positiven Effekt auf die Produktionsbilanz hätte. Allerdings bleibt zu beachten, dass die in der Tabelle angegeben Werte eine theoretische Einsparung gegenüber einer reinen Neuproduktion darstellen, sofern das zugrunde liegende Recycling verbrauchsfrei arbeiten würde. Dies ist jedoch realiter mitnichten der Fall, sodass selbst eine teilweise Verwendung der gleichen Repetierfaktoren während des

Tabelle 5-12: Idealisiertes maximales absolutes und prozentuales Einsparpotenzial im Falle einer Wiederverwendung des Glases, Aluminiumrahmens und der Wafer aus dem Recycling zur Wiederverwendung.

	Energie- und Stoffeinsparungen	Einheit	Einsparpotenzial			
			absolut		prozentual	
			je $gSSM_{sc}$	je $gSSM_{mc}$	je $gSSM_{sc}$	je $gSSM_{mc}$
Energie	**Strom**	kWh	-271,24	-202,36	83,63%	79,22%
Energie	**Wärme**	MJ	-357,28	-293,54	95,50%	94,57%
Siliziumsurrogat	**Quarz**	kg	-3,90	-4,15	100,00%	100,00%
Siliziumsurrogat	**MGS**	kg	-1,44	-1,54	100,00%	100,00%
Siliziumsurrogat	**SGS_{p}**	kg	-1,28	-1,36	100,00%	100,00%
Siliziumsurrogat	**$SGS_{sc/mc}$**	kg	-1,19	-1,19	100,00%	100,00%
Siliziumsurrogat	**$Wafer_{sc/mc}$**	Stk	-65,77	-65,77	100,00%	100,00%
Siliziumsurrogat	**$Zelle_{sc/mc}$**	Stk	0,00	0,00	0,00%	0,00%
Repetierfaktoren	**$Aceton_{fl}$**	g	-58,46	0,00	73,59%	0,00%
Repetierfaktoren	**Acrylbindemittel (34 % in H_2O)**	g	-3,20	-3,20	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Aluminiumlegierung**	kg	-2,63	-2,63	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**$Argon_{fl}$**	g	-6.908,34	-318,57	99,44%	89,18%
Repetierfaktoren	**Bor**	mg	-0,49	-0,52	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**DPM**	g	-480,21	-480,21	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Essigsäure (98 %ig)**	g	-191,25	-62,43	97,82%	93,62%
Repetierfaktoren	**Fluorwasserstoff**	g	-60,44	0,00	51,59%	0,00%
Repetierfaktoren	**Glas**	kg	-14,26	-14,26	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Glaswolle**	g	-16,01	-16,01	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Graphit**	kg	-0,14	-0,15	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Hackschnitzel**	kg	-1,95	-2,07	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**$Helium_{gas}$**	g	/	-0,14	/	100,00%
Repetierfaktoren	**Holzkohle**	g	-245,25	-261,29	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Messing (Sägedraht)**	g	-11,85	-11,85	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Natriumhydroxid**	g	-24,01	-24,01	9,23%	9,23%
Repetierfaktoren	**Natronlauge (50 %ig)**	g	-496,39	-476,07	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**PEG (TEG)**	kg	-4,34	-4,34	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Petrolkoks**	g	-721,32	-768,51	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Salpetersäure (50 %ig)**	g	-112,97	/	100,00%	/
Repetierfaktoren	**Salzsäure (30 %ig)**	g	-2.047,00	-2.180,63	96,76%	96,95%
Repetierfaktoren	**$Sauerstoff_{fl}$**	g	-28,85	-30,74	15,84%	16,70%
Repetierfaktoren	**Siliziumcarbid**	kg	-4,21	-4,21	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Stahl (Sägedraht)**	kg	-2,37	-2,37	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**$Stickstoff_{fl}$**	g	0,00	-55,78	0,00%	1,96%
Repetierfaktoren	**$Wasserstoff_{fl}$**	kg	-0,06	-0,07	100,00%	100,00%

Recyclings den stoffspezifischen Einsparpotenzialen separat gegengerechnet werden müsste. Dementsprechend kann es bei einzelnen Repetierfaktoren oder beim Einsatz sehr energieintensiver Recyclingverfahren auch zu einem Mehrbedarf einzelner Stoffe oder benötigter Energien kommen. Gleichwohl kann die Verwendung alternativer Stoffe

während der Recyclingverfahren den bilanziellen Vergleich zusätzlich belasten. Alle nicht in der Tabelle 5-12 aufgeführten Repetierfaktoren finden erst nach der jeweiligen, der Substitution des Siliziumsurrogates entsprechenden, Fertigungsstufe Einzug in die Produktionssequenz eines $gSSM_{sc/mc}$, weshalb sie keine quantitative Veränderung erfahren. Dies gilt allerdings nicht für die beiden weiteren wiederverwendeten Rezyklate Glas und Aluminiumrahmung. Diese sind ob deren Sonderstellung zusammen mit dem für den Vergleich relevanten Siliziumsurrogat in der Tabelle 5-12 orange hervorgehoben. Jedwede Repetierfaktoren, die keine 100 % prozentuales Einsparpotenzial aufweisen, finden demzufolge sowohl bis als auch nach der Waferfertigung Anwendung in der Produktionssequenz nach Anhang 4-11.

Wenngleich die für das Recyclingverfahren verwendeten Mengen der notwendigen Stoffe allesamt unbekannt sind, so ist speziell im vorliegenden Beispiel zumindest die Art der eingesetzten Stoffe teilweise publik. Da sich das gewählte Beispiel wie eingangs erwähnt an der Recyclingsequenz der SolarWorld AG orientiert, können die Erkenntnisse des entsprechenden Kapitels 5.3.2 einige Anhaltspunkte liefern. Demnach erfolgt die wesentliche Zugabe von Prozessstoffen während der Ätzschritte sowie zur Reinigung. Dabei kommen Gemische aus KOH und H_2O_2 (Entfernung Pyrolyserückstände), Ätzlösungen auf Basis von HNO_3 (Entfernung silberhaltige Frontkontakte), NaOH oder eine $AlCl_3$-Lösung (Ätzung des vollflächigen Aluminiumrückkontaktes) sowie ein ternäres Gemisch bestehend aus H_2O, HNO_3 und HF (Entfernung n^+-Emitter) zum Einsatz.

- Salpetersäure (HNO_3) findet während der gesamten Produktionssequenz nach Anhang 4-11 nur für Ätzprozesse zur Reinigung des SGS_p vor dem Schmelzprozess des CZ-Verfahrens (monokristalline Kristallqualität) Anwendung. Das idealisierte maximale Einsparpotenzial beträgt sonach für die Rezyklierung monokristalliner Wafer 100 %; im Falle multikristalliner Wafer ob der Absenz von Salpetersäure im Produktionsprozess 0 %. Unter realen Bedingungen ist indessen infolge der mehrfachen Nutzung von Salpetersäure während des Recyclingprozesses für beide Kristallqualitäten mit einem bilanziellen Mehrbedarf zu rechnen. Im Falle von multikristallinen Wafern erscheint dies evident, da Salpetersäure bei der Neuproduktion keine Rolle spielt und entsprechend jedwede Verwendung während des Recyclingprozesses eine Erhöhung des Gesamtbedarfs nach sich ziehen muss. Bei der Wiederverwendung monokristalliner Siliziumrohwafer ist in Abhängigkeit der Höhe der im

Recyclingverfahren real eingesetzten Menge zu unterscheiden, ob weiterhin eine Reduzierung des Gesamteinsatzes vorliegt, oder ob es sich ebenfalls um eine gesamtbilanzielle Erhöhung handelt. Letzteres ist der Fall, wenn die eingesetzten Mengen im Recyclingverfahren die in der Tabelle 5-12 angegebenen absoluten maximalen Einsparpotenziale übersteigen. Da Salpetersäure während des Recyclingprozesses für Ätzprozesse aller Altzellen Anwendung findet und während der Neuproduktion nur zum Zwecke der Reinigung einzelner zerkleinerter SGS_p-Stückchen eingesetzt wird, ist folglich auch im monokristallinen Fall von einer Erhöhung des bilanziellen Gesamtbedarf im Vergleich zur Neuproduktion auszugehen. Real ergäbe sich für Salpetersäure sonach aus der Wiederverwendung kristalliner Siliziumrohwafer kein Einsparpotenzial, sondern unabhängig der zugrunde liegenden Kristallqualität ein Mehrbedarf – oder anders ausgedrückt: Der Einsatz von Salpetersäure im Recyclingverfahren übersteigt dessen mögliche Einsparungen durch die Substitution der vorgelagerten Produktionsschritte.

- Fluorwasserstoff (HF) kommt eine Sonderstellung zu, da es bei der Neuproduktion kristalliner Siliziumsolarmodule in Abhängigkeit der Kristallqualität zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Produktionssequenz Einsatz findet und sich zudem die absolut verwendeten Mengen für die beiden Kristallqualitäten unterscheiden. Den Angaben der Tabelle 4-25 (Seite 281f) folgend, kann sich für die Rezyklierung multikristalliner Siliziumrohwafer kein Einsparpotenzial für Fluorwasserstoff ergeben weil nur während der Solarzellenproduktion verwendet. Dementsprechend ist für dieses spezifische Recyclingverfahren infolge der Wiederverwendung multikristalliner Siliziumrohwafer in jedem Fall von einem bilanziellen Mehrbedarf an Fluorwasserstoff auszugehen. Bei der Wiederverwendung monokristalliner Siliziumrohwafer kann es hingegen ob der Substitution der bei einer Neuproduktion zur Reinigung der zerkleinerten SGS_p-Stückchen im Vorfeld des CZ-Verfahrens eingesetzten Menge zu einer bilanziellen Gesamteinsparung kommen. Diese muss jedoch geringer als die in der Tabelle 5-12 angegebene idealisierte prozentuale maximale Einsparung in Höhe von 51,59 % ausfallen, weil jener Maximalwert um den stoffspezifischen Gesamtbedarf im ternären Gemisch während des Recyclingverfahrens reduziert werden müsste. Folglich ist wie im Falle der Wiederverwendung multikristalliner Siliziumrohwafer auch für die monokristallinen Pendants ebenfalls ein

bilanzieller Mehrbedarf möglich, sofern die real eingesetzten Mengen im Recyclingverfahren die idealisierten absoluten maximalen Einsparpotenziale nach Tabelle 5-12 übersteigen.

- Wasserstoffperoxid (H_2O_2), Kaliumhydroxid (KOH) und Aluminiumchlorid ($AlCl_3$) finden bei der gesamten Produktionssequenz zur Herstellung eines $gSSM_{sc/mc}$ laut Tabelle 4-25 keine Anwendung. Alle drei Chemikalien sind indessen essentieller Bestandteil der Ätzvorgänge im Recyclingprozess. Folglich zeitigt die Verwendung dieser drei Chemikalien während des Recyclingansatzes eine stoffspezifische bilanzielle Zusatzbelastung verglichen zur reinen Neuproduktion.

Im Gegensatz zu den voranstehenden stoffspezifischen Betrachtungen geht der energetische Hauptaufwand des Gesamtverfahrens hinwieder auf den Pyrolysevorgang zusammen mit dem Betrieb der Nachverbrennung (Sekundärmaßnahme) zurück. Infolge der konkreten Anwendung des Recyclingansatzes der SolarWorld AG beispielshalber bei der Behandlung der Photovoltaikgroßanlage von der Insel Pellworm und des belgischen Solarparks Chevetogne konnten erste reale Erfahrungswerte über den Energieverbrauch des Gesamtverfahrens erzeugt und gesammelt werden. Laut [Müller *et al.* 2006] sind demnach circa 92 kWh zum Recycling eines Moduls notwendig. Die Stichhaltigkeit dieser Angabe lässt sich allerdings nicht weiter überprüfen. Die angegebenen 92 kWh sollen den Energieverbrauch der gesamten Verfahrenssequenz wiedergeben, wobei dieser sich aus der Summe des eingesetzten Erdgases und der benötigten elektrischen Energie (sowohl für den pyrothermischen Prozess samt des Betriebes der Sekundärmaßnahme als auch für die chemischen Ätzschritte) zusammensetzt. Die Umrechnung von Primärenergie auf elektrische Energie erfolgte nach [Müller *et al.* 2006] mittels eines Wirkungsgrades von 35 %. Das Verhältnis der eingesetzten Primärenergie und der tatsächlich direkt benötigten elektrischen Energie wird dabei jedoch nicht mit angegeben, weshalb eine zur vorangegangenen stofflichen Betrachtung analoge Gegenrechnung dieses verfahrensspezifischen Energieverbrauchs zu den in der Tabelle 5-12 angegebenen Werten nicht möglich ist. Wird vereinfachend der gesamte Energieaufwand des Recyclingverfahrens von 92 kWh nur auf die benötigte elektrische Energie zur Neuproduktion bezogen, sinkt das maximale prozentuale Einsparpotenzial für elektrischen Strom auf 55,3 % im monokristallinen Fall, beziehungsweise 43,2 % für die Fertigung multikristalliner Photovoltaikmodule. Eine zweite Möglichkeit des vereinfachten Vergleiches stellt die Umrechnung und Zusammenfassung der in der

Tabelle 5-12 und der Tabelle 4-25 aufgeführten Werte entsprechend der Art und Weise wie in der Bezugsquelle dar. Dies führt in der Konsequenz zu ähnlichen Ergebnissen: Eine Senkung des maximal prozentualen Einsparpotenzials auf 59,32 % je $gSSM_{sc}$ und 48,63 % je $gSSM_{mc}$. Diese vereinfachte und an sich nicht statthafte Betrachtung lässt jedoch den Schluss zu, dass ein reales energetisches Einsparpotenzial um rund die Hälfte der initial zur Neuproduktion von $gSSM_{sc/mc}$ benötigten Energie durch das Szenario Recycling zur Verwendung möglich wäre.

Den soeben getroffenen Ausführungen zuwider unterscheiden sich allerdings beim benannten Recyclingansatz die benötigten Energie- und Stoffströme, wie bereits detailliert diskutiert, batchweise, da die einzelnen Verfahrensparameter an die jeweiligen Gegebenheiten und Anforderungen der entsprechenden Altmodulbatches anzupassen sind. Sie zeigen also ein dynamisches Verhalten, ganz im Gegenteil zur quasistatischen Neuproduktion. Dementsprechend erweist sich eine Angabe beziehungsweise die Generierung adäquater und zuverlässiger (durchschnittlicher) Verbrauchswerte des Recyclingverfahrens als extrem schwierig, nicht zuletzt auch durch die nur okkasionell vorhandenen Erfahrungswerte. Dies wirkt sich ebenfalls entsprechend stark auf die Angabe etwaiger Einsparpotenziale aus.

Daher ist es wichtig nochmals zu betonen, dass es sich bei den Angaben in der Tabelle 5-12 auf Seite 494 um idealisierte Maximalwert handelt, die eine theoretische obere Schranke stoff- und energiespezifischer Einsparpotenziale infolge einer vollständigen Substitution neuproduzierter Wafer durch recycelte Wafer nach dem im Kapitel 5.3.2 diskutierten Verfahren der SolarWorld AG definieren.

Wird zudem anstelle des Recyclingansatzes der SolarWorld AG das Verfahren von Park *et al.* 2016 eingesetzt, würden die stofflichen maximalen Einsparpotenziale noch besser ausfallen, da jenes Recyclingverfahren ob des mechanischen Verfahrensschrittes wesentlich weniger Chemikalien benötigt. Allerdings ist mit dem diskutierten Ansatz der SolarWorld AG darüber hinaus die Wiederverwendung der als Premiumprodukt bezeichneten Form: „p-dotierter, texturierter, kristalliner Siliziumwafer“ möglich. Deren direkte Wiederverwendung würde die während der Produktionssequenz nach Anhang 4-11 zur Oberflächenätzung, Texturierung und Reinigung der kristallinen Siliziumrohwafer benötigten Stoffströme zusätzlich den in der Tabelle 5-12 bereits aufgeführten Werten als Einsparpotenziale zuschreiben. Gleiches gilt für den Anteil der eingesparten Energie.

Stehen der bisher getroffenen Annahme entgegen nicht genügend Altmodule zur Verfügung, um den Einsatz neuproduzierter Wafer vollends zu substituieren, gestaltet sich die Berechnung möglicher Einsparpotenziale um ein vielfaches komplexer – unabhängig vom zugrunde liegenden Recyclingverfahren. So sind den ursprünglichen idealisierten maximalen Einsparpotenzialen neben den für das Recycling benötigten Materialien und Energien zusätzlich die Anteile an Stoff- und Energieströmen der neuproduzierten Einheiten Siliziumsurrogate, die nicht über das Recycling abgedeckt werden, gegenzurechnen. Zur Bestimmung dieses Anteils muss die Anzahl der wiederverwendbaren Siliziumsurrogate vom entsprechende *kPM*[154] abgezogen werden. Im Falle der Rezyklierung von kristallinen Siliziumrohwafern ist laut Tabelle 4-26 auf Seite 285 kPM_4 zugeordnet. Es sind folglich insgesamt 65,775 kristalline Siliziumrohwafer zur Produktion eines $gSSM_{sc/mc}$ notwendig, unabhängig ob neuproduziert oder recycelt. Stehen, bezogen auf eine Einheit eines zu produzierenden $gSSM_{sc/mc}$, aus dem Recycling beispielshalber nur 40 Wafer zur Verfügung, sind zur Herstellung eines Moduls sonach 25,775 neuproduzierte Siliziumrohwafer samt der dafür benötigten Stoff- und Energieströme zusätzlich zu den Rezyklaten erforderlich.

Wenngleich die Sekundärrohstoffe aus dem Recycling zur Verwendung sowohl dem brancheninternen als auch dem branchenexternen Markt zur Verfügung stehen, bietet sich vordergründig die Wiederverwendung der einzelnen recycelten Komponenten ob deren ursprünglichen Spezifikationen (Reinheit, Abmaße, Zusammensetzung et cetera) an – sofern nicht während des Recyclings über die branchenintern Anforderungen hinaus beeinflusst. Im Falle des Recyclings zur Verwertung kann sich die Situation vollkommen anders darstellen, selbst bei der Nutzung der gleichen technologischen Basis wie beim Recycling zur Verwendung. Als Grenzbetrachtung soll vereinfachend nochmals das Recyclingverfahren der SolarWorld AG zugrunde gelegt werden. Wird der Sequenz ein Zerkleinerungsprozess vorgeschalten, was im weitesten Sinne einem Zerbersten der Module beziehungsweise einzelner betrachtungsrelevanter Komponenten gleichkommt, sind betreffende Materialien per se nicht wieder- oder weiterverwendbar, obschon das gleiche technologische Prinzip Einsatz findet. Der bisherigen Betrachtung folgend, würde bei einer angestrebten Verwertung der Altmodule die Abhängigkeit von der Inputqualität auf ein Mindestmaß sinken, da infolge des Zerkleinerungsprozesses vorangegangene

[154] Wurde im Kapitel 4.5.6: „Zusammenfassende Betrachtungen zur Produktion von Standardsolarmodulen auf Basis der kristallinen Siliziumsolartechnologie“ eingeführt und definiert.

Qualitätseinbußen aus falscher Lagerung, Transportschäden, unfachmännischem Handling et cetera keinen Einfluss auf den Output besitzen. Als Folge daraus steigt die verfügbare Menge prozessrelevanten Inputs und die Verfahrenskosten sinken ob geringerer verfahrensinterner Anforderungen an die Sensibilität des Anlagenequipments (betrifft zuvörderst das Handling sowie den prozessinternen Transport der dünnen und zerbrechlichen Wafer). Zudem sinkt die Varianz der benötigten Stoff- und Energieströme ob der vorgeschalteten (Teil-)Homogenisierung des Prozessinputs. Dementgegen bedeutet eine Wiederverwertung der Altmodule verglichen zur Wiederverwendung in der Konsequenz eine Senkung der Einbringungsstufe der recycelten Komponenten und damit eine Reduktion der maximalen Einsparpotenziale sowohl in ihren Einzelausprägungen als auch in ihrer verfahrensspezifischen stofflichen Vielfalt. Um diese Behauptungen zu substanziieren sollen analog der Betrachtungen zum Recycling zur Verwendung die idealisierten maximalen absoluten und prozentualen Einsparpotenziale ermittelt werden, wobei der Vergleichbarkeit der beiden Ergebnisse und der darauf aufbauend Diskussion begünstigend vorerst kein für eine Verwertung spezifisch entwickeltes Recyclingverfahren zugrunde gelegt wird - vereinfachend bildet vielmehr das bereits ausführlich beschriebene Recyclingverfahren der SolarWorld AG die technologische Basis. Um dem Ziel der Verwertung der Altmodule gerecht zu werden, soll gedanklich ein Zerkleinerungsprozess zur Homogenisierung des Inputs die Vorsortierung[155] substituieren. Zudem wird die Annahme getroffen, dass sich beide Verfahrensvariationen (zur Verwendung und zur Verwertung) im Energieverbrauch und stofflichen Aufwand gleichen; folglich die beiden initialen Prozessschritte den gleichen Verbrauch aufweisen.

Infolge der im Recyclingverfahren verankerten Ätzschritte zur Entfernung der Metallisierungen, der Antireflexionsschicht und des n^+-Emitters von den zerkleinerten Altzellen bleibt letztendlich kristalliner Siliziumbruch übrig, der samt der Dotierung chemisch den Spezifikationen der beiden SGS-Kristallqualitäten vollends entspricht. Eine nachträgliche Separierung der beiden Kristallqualitäten ist ökonomisch nicht sinnvoll durchführbar und darüber hinaus schlicht nicht notwendig, was sich wie folgt begründet. In die Produktionssequenz eines $gSSM_{sc/mc}$ kann Siliziumbruch nur in den jeweiligen Schmelzen zur Ingotherstellung wieder zugeführt werden. Hierfür ist die Kristallqualität der Rezyklate unerheblich, da sowohl das CZ-Verfahren als auch das Kokillengussverfahren jene physikalische Eigenschaft der daraus hervorgehenden Ingots

[155] Das ursprüngliche Grobschema des Recyclingverfahrens der SolarWorld AG findet sich in der Abbildung 5-20 auf Seite 465.

effizieren[156]. Sonach ist der kristalline Siliziumsolarbruch aus dem Recyclingverfahren als SGS_p anzusehen, welches die entsprechende Menge SGS_p aus dem modifizierten Siemensprozess in der Produktionssequenz eines $gSSM_{sc/mc}$ nach Anhang 4-11 substituiert. Der bisherigen Logik folgend ist diesem brancheninternen Rezyklierungspunkt der *kPM₂* zugeordnet. Ergo entfallen bei der Ermittlung der maximalen Einsparpotenziale alle Einzelbeiträge von Repetierfaktoren auf die Fertigungsstufen mit den Stufenindikatoren eins und zwei, sofern die Quantität des rezyklierten SGS_p holotisch zur Substitution des neuproduzierten Pendants aus dem modifizierten Siemensprozess ausreicht. Das Verhältnis der Menge des aus einem Altmodul generierbaren SGS_p und des zur Neuproduktion eines kristallinen Siliziumsolarmoduls benötigten SGS_p fällt allerdings wesentlich schlechter als bei der Wiederverwendung kristalliner Siliziumrohwafer aus, da der hohe Materialverlust aus dem abrasiven Verfahrensschritt zur Wafervereinzelung mit abgedeckt werden muss. Um den gesamten Bedarf von polykristallinem SGS zur Produktion neuer $gSSM_{sc/mc}$ durch die Wiederverwertung von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen abzudecken, sind bei verlustfreien Recyclingverfahren je neuproduzierter Einheit mehr als zwei Altmodule notwendig. Dies ergibt sich aus dem Vergleich der Angaben aus der Tabelle 4-28 (Kapitel 4.5.6.1 auf Seite 290) und der Tabelle 4-25 auf den Seiten 281f. Sollten zur totalen Substitution des SGS_p jedoch genügend Altmodule zum Recycling zur Verwertung verfügbar sein, eventualiter auch durch Altmodulimporte, lassen sich ebenfalls idealisierte maximale Einsparpotenziale ermittelt und mit jenen der Tabelle 5-12 zumindest auf theoretischer Ebene vergleichen.

Zum Zwecke der Vergleichbarkeit der idealisierten maximalen Einsparpotenziale zwischen den beiden Recyclingprinzipien ist die Darstellung der nachstehenden Tabelle 5-13 an die der Tabelle 5-12 angelehnt. Zudem erfolgte die Berechnung aller Einzelwerte ebenfalls in analoger Art und Weise wie beim Recycling zur Verwendung. Dementsprechend wird auf eine ausführliche Diskussion zur Berechnung und zur übergeordneten Deutung der Ergebnisse, ausgenommen spezieller Einzelwerte, an dieser Stelle verzichtet und auf die vorangegangenen Betrachtungen verwiesen. Genau wie im Falle des Recyclings zur Verwendung können diesen idealisierten Maximalwerten die Verbrauchswerte des zugrunde liegenden Recyclingverfahrens gegengerechnet werden, wobei diese sich ob der getroffenen Annahmen nicht verändert haben. Das Resultat dieser Gegenrechnung lässt sich wie folgt zusammenfassen. Alle zum Recycling benötigten Prozessstoffe

[156] Vergleich hierzu Kapitel 4.5.2.2 zur Ingotherstellung auf den Seiten 226ff.

(Salpetersäure, Fluorwasserstoff, Wasserstoffperoxid, Kaliumhydroxid und Aluminiumchlorid) finden in der Produktionssequenz nach Anhang 4-11 entweder keine oder erst nach dem Rezyklierungspunkt Anwendung, weshalb es in diesen stoffspezifischen Fällen ausnahmslos zu einer bilanziellen Mehrbelastung respektive einer Zusatzbelastung verglichen zur reinen Neuproduktion kommt.

Tabelle 5-13: Idealisiertes maximales absolutes und prozentuales Einsparpotenzial im Falle des Recyclings zur Verwertung und einer Wiederverwertung der Altzellen als SGS_p.

	Energie- und Stoffeinsparungen	Einheit	Einsparpotenzial			
			absolut		prozentual	
			je $gSSM_{sc}$	je $gSSM_{mc}$	je $gSSM_{sc}$	je $gSSM_{mc}$
Energie	**Strom**	kWh	-156,30	-166,53	48,19%	65,19%
Energie	**Wärme**	MJ	-269,51	-287,14	72,04%	92,51%
Siliziumsurrogat	**Quarz**	kg	-3,90	-4,15	100,00%	100,00%
Siliziumsurrogat	**MGS**	kg	-1,44	-1,54	100,00%	100,00%
Siliziumsurrogat	**SGS_p**	kg	-1,28	-1,36	100,00%	100,00%
Siliziumsurrogat	**$SGS_{sc/mc}$**	kg	0,00	0,00	0,00%	0,00%
Repetierfaktoren	**Bor**	mg	-0,49	-0,52	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Graphit**	kg	-0,14	-0,15	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Hackschnitzel**	kg	-1,95	-2,07	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Holzkohle**	g	-245,25	-261,29	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Natronlauge (50 %ig)**	g	-446,83	-476,07	90,02%	100,00%
Repetierfaktoren	**Petrolkoks**	g	-721,32	-768,51	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Salzsäure (30 %ig)**	g	-2.042,67	-2.176,31	96,55%	96,76%
Repetierfaktoren	**$Sauerstoff_{fl}$**	g	-28,85	-30,74	15,84%	16,70%
Repetierfaktoren	**$Wasserstoff_{fl}$**	kg	-0,06	-0,07	100,00%	100,00%

Das reale energetische Einsparpotenzial sinkt bei analoger Gegenrechnung der 92 kWh auf 19,8 % beziehungsweise 25,1 % für die Nutzung zur Produktion monokristalliner Siliziumsolarmodule und auf 29,2 % beziehungsweise 35,87 % im multikristallinen Fall. Die jeweils erste Prozentangabe ergibt sich bei der Gegenrechnung zur reinen elektrischen Energie, der jeweilige zweite Wert aus der Gegenrechnung zur Gesamtenergie. Die energetischen Einsparpotenziale gehen in toto fast ausschließlich auf die Substitution der energieintensiven Siliziumraffination (modifizierter Siemensprozess) zurück. Die Umkehrung der Rangfolge der Einsparpotenziale bezüglich der Wiederverwertung im mono- und multikristallinen Fall verglichen zum Recycling zur Verwendung begründet sich in der hohen Differenz des energetischen Aufwandes zur sich anschließenden Aufbereitung der beiden Kristallqualitäten. Allerdings können sich infolge der

Fortentwicklung der Produktionstechnologien[157] die gesamten energetischen Einsparpotenziale auch wesentlich geringer darstellen beziehungsweise in bilanzielle Mehrbelastungen umkehren.

Wie bereits angedeutet, ist auf dem Wege des Recyclings zur Verwertung ob des Rezyklierungspunktes in die Produktionssequenz eine Fertigung eines neuen $gSSM_{sc/mc}$ aus einem einzigen $gSSM_{alt}$ per se nicht möglich. Dies wirkt sich in gleicher Weise wie beim Recycling zur Verwendung auf die angegebenen Einsparpotenziale aus. Laut *kPM₂* werden 1,2767 kg SGS_p respektive 1,3602 kg SGS_p für die Produktion kristalliner Siliziumsolarmodule der entsprechenden Kristallqualitäten benötigt. Laut Tabelle 4-28 beinhaltet ein $gSSM_{sc/mc}$ letztlich aber nur 612 g. Folglich wären zur totalen Substitution des eingesetzten SGS_p bei sonstiger Konstanz aller weiteren Faktoren und einem verlustfreien Recyclingverfahrens im monokristallinen Fall circa 2,09 Altmodule und im Falle multikristalliner Siliziumsolarmodule 2,22 Altmodule notwendig. Die Differenz müsste sonach über neuproduziertes SGS_p samt der dafür notwendigen Stoff- und Energieströme ausgeglichen werden – oder anders ausgedrückt: Durch das Recycling zur Verwertung und der Rezyklierung des gesamten Siliziums aus einem $gSSM_{alt}$ in Form von SGS_p in die Fertigung eines kristallinen Siliziumsolarmoduls könnten 57 % des sonst zu produzierenden SGS_p und der dafür notwendigen Energieströme eingespart werden (abzüglich der für den Recyclingprozess benötigten Energie).

Eine weitere Möglichkeit des Recyclings zur Verwertung bei qualitativ minderwertigerer Behandlung ist die Rezyklierung der Altzellen in den Produktionsprozess in Form von MGS. Wenngleich hierdurch wiederum die Verfahrenskosten zusammen mit dem Bedarf der für den Recyclingprozess notwendigen Energie- und Stoffströme sinken, ergeben sich ebenfalls geringere Einsparpotenziale sowohl auf stofflicher als auch auf energetischer Ebene. Diese wären letztlich nur durch die Bedarfe der Fertigungsstufe mit dem Stufenindikator eins definiert.

[157] Beachte hierzu die im Kapitel 4.5.2 aufgeführten Technologiesubstitutionspotenziale wie beispielshalber den Einsatz von Wirbelschichtreaktoren zur Siliziumraffination und den damit einhergehenden energetischen Einsparungen in Höhe von circa 70 % beim energieintensivsten Teilschritt der gesamten Fertigungssequenz.

Tabelle 5-14: Idealisiertes maximales absolutes und prozentuales Einsparpotenzial im Falle des Recyclings zur Verwertung und einer Wiederverwertung der Altzellen als MGS.

	Energie- und Stoffeinsparungen	Einheit	Einsparpotenzial			
			absolut		prozentual	
			je $gSSM_{sc}$	je $gSSM_{mc}$	je $gSSM_{sc}$	je $gSSM_{mc}$
Energie	**Strom**	kWh	-15,87	-16,91	4,89%	6,62%
	Wärme	MJ	-33,32	-35,51	8,91%	11,44%
Si-surrogat	**Quarz**	kg	-3,90	-4,15	100,00%	100,00%
	MGS	kg	-1,44	-1,54	100,00%	100,00%
	SGS_p	kg	0,00	0,00	0,00%	0,00%
Repetierfaktoren	**Graphit**	kg	-0,14	-0,15	100,00%	100,00%
	Hackschnitzel	kg	-1,95	-2,07	100,00%	100,00%
	Holzkohle	g	-245,25	-261,29	100,00%	100,00%
	Petrolkoks	g	-721,32	-768,51	100,00%	100,00%
	$Sauerstoff_{fl}$	g	-28,85	-30,74	15,84%	16,70%

Der Vergleich der Tabelle 5-14 mit der Tabelle 4-25 macht deutlich, dass infolge des niedrigen Rezyklierungspunktes energetisch in Summe zwar ein idealisiertes Einsparpotenzial zu verzeichnen ist, real ob des Eigenbedarfs des Recyclingverfahrens indessen ein bilanzieller energetischer Mehraufwand resultieren würde. Zudem könnten diese geringen stofflichen Gesamteinsparungen die materiellen Zusatzbelastungen durch den Recyclingprozess selbst nur geringfügig ausgleichen. Zu teilweise ähnlichen Ergebnisse kommt auch [Latunussa *et al.* 2016] bezüglich des FRELP-Projektes. Als Verfahrensziel wird ebenfalls die Wiederverwertung des Siliziums als MGS angestrebt. Wenngleich sowohl der Output der von [Latunussa *et al.* 2016] beschriebenen Verfahrensvarianten als auch die verfahrensnotwendigen Energie- und Stoffströme mit den in der vorliegenden Arbeit diskutierten Angaben annähernd übereinstimmen, stellen sich die resultierenden Schlussfolgerungen unterschiedlich dar. [Latunussa *et al.* 2016] attestiert der Wiederverwertung des Siliziums als MGS in toto ganzheitlich Einsparpotenziale. Allerdings scheint die Bezugsbasis der Produktion neuer kristalliner Siliziumsolarmodule fehlerbehaftet, da der materialintensive Sägeprozess zur Wafervereinzelung keine Beachtung findet. Dies lässt in der Konsequenz natürlich wesentlich höhere Einsparpotenziale zu. Nebstdem zielt die Aufarbeitung mehr auf die Reduktion von Umweltbelastungen infolge der Recyclingprozesse und nicht auf branchenineterne Einsparpotenziale ab. Im Falle des Recyclings zur Verwertung und der speziellen Begebenheit der Rezyklierung des Siliziums als MSG können die in [Latunussa *et al.* 2016] angegebenen Werte zu den in der vorliegenden Arbeit diskutierten Ergebnisse sonach einen ergänzenden Charakter aufweisen.

Die dem idealisierten Fall des Recyclings zur Verwertung konkret zugeschriebenen Ansätze wie das Recyclingverfahren der LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG (Kapitel 5.3.5 auf den Seiten 475ff) und das Verbundprojekt CABRISS (Kapitel 5.3.8 auf den Seiten 486f) lassen indessen ob nicht vorhandener oder nicht öffentlich zugänglicher Daten keine direkte Diskussion etwaiger Einsparpotenziale zu. Da die einzelnen Einsparpotenziale bezogen auf die Rezyklierung des Siliziums aus Altmodulen für die drei Varianten:

- Wiederverwendung als kristalliner Siliziumrohwafer inklusiver der verlustfreien Wiederverwendung des Frontglases und der Modulrahmung,
- Wiederverwertung als SGS_p in der Ingotschmelze und
- Wiederverwertung als MGS zur Siliziumraffination

mittels einer geringfügigen gedanklichen Variation des grundlegenden Verfahrensprinzips des Recyclingansatzes der SolarWorld AG, welches zudem eines der wenigen erprobten Verfahren darstellt, diskutiert werden konnten, kann die gezielte Gegenüberstellung der einzelnen Ergebnisse die Abhängigkeit der idealisierten maximalen Einsparpotenziale vom brancheninternen Rezyklierungspunkt in die Produktionssequenz eines $gSSM_{sc/mc}$ nach Anhang 4-11 weiter verdeutlichen. Dieserhalb sind in Tabelle 5-15 auf der nachfolgenden Seite die jeweiligen prozentualen Ergebnisse der Tabelle 5-12, Tabelle 5-13 und Tabelle 5-14 nochmals zusammengetragen. Der Übersichtlichkeit halber sind in der Tabelle 5-15 nur in den Zellen Werte eingefügt, die tatsächlich ein prozentuales Einsparpotenzial aufweisen. Die jeweils orange hinterlegten Zellen sollen die Rezyklierungspunkte der entsprechenden Spalten obendrein optisch hervorheben. Wenngleich diese Teilergebnisse vorerst technologieunabhängige Maximalwerte darstellen, ist ob der gleichen technologischen Bezugsbasis eine einheitliche Diskussion der fallspezifischen Auswirkungen auf die jeweiligen Einsparpotenziale überhaupt erst möglich.

Tabelle 5-15: Vergleich der idealisierten maximalen prozentualen Einsparpotenziale für die Wiederverwendung der Altzellen als kristalliner Siliziumrohwafer, deren Wiederverwertung als SGS_p und der Wiederverwertung als MGS mittels des Recyclingverfahrens der SolarWorld AG.

	Energie- und Stoffeinsparungen	Einheit	Prozentuales Einsparpotenzial bei der Rezyklierung als					
			Rohwafer		SGS_p		MGS	
			je $gSSM_{sc}$	je $gSSM_{mc}$	je $gSSM_{sc}$	je $gSSM_{mc}$	je $gSSM_{sc}$	je $gSSM_{mc}$
Energie	**Strom**	kWh	83,63%	79,22%	48,19%	65,19%	4,89%	6,62%
Energie	**Wärme**	MJ	95,50%	94,57%	72,04%	92,51%	8,91%	11,44%
Siliziumsurrogat	**Quarz**	kg	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Siliziumsurrogat	**MGS**	kg	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Siliziumsurrogat	**SGS_p**	kg	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%		
Siliziumsurrogat	**$SGS_{sc/mc}$**	kg	100,00%	100,00%				
Siliziumsurrogat	**$Wafer_{sc/mc}$**	Stk	100,00%	100,00%				
Repetierfaktoren	**$Aceton_{fl}$**	g	73,59%					
Repetierfaktoren	**Acrylbindemittel (34 % in H_2O)**	g	100,00%	100,00%				
Repetierfaktoren	**Aluminiumlegierung**	kg	100,00%	100,00%				
Repetierfaktoren	**$Argon_{fl}$**	g	99,44%	89,18%				
Repetierfaktoren	**Bor**	mg	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%		
Repetierfaktoren	**DPM**	g	100,00%	100,00%				
Repetierfaktoren	**Essigsäure (98 %ig)**	g	97,82%	93,62%				
Repetierfaktoren	**Fluorwasserstoff**	g	51,59%					
Repetierfaktoren	**Glas**	kg	100,00%	100,00%				
Repetierfaktoren	**Glaswolle**	g	100,00%	100,00%				
Repetierfaktoren	**Graphit**	kg	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Hackschnitzel**	kg	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**$Helium_{gas}$**	g	/	100,00%				
Repetierfaktoren	**Holzkohle**	g	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Messing (Sägedraht)**	g	100,00%	100,00%				
Repetierfaktoren	**Natriumhydroxid**	g	9,23%	9,23%				
Repetierfaktoren	**Natronlauge (50 %ig)**	g	100,00%	100,00%	90,02%	100,00%		
Repetierfaktoren	**PEG (TEG)**	kg	100,00%	100,00%				
Repetierfaktoren	**Petrolkoks**	g	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Repetierfaktoren	**Salpetersäure (50 %ig)**	g	100,00%	/				
Repetierfaktoren	**Salzsäure (30 %ig)**	g	96,76%	96,95%	96,55%	96,76%		
Repetierfaktoren	**$Sauerstoff_{fl}$**	g	15,84%	16,70%	15,84%	16,70%	15,84%	16,70%
Repetierfaktoren	**Siliziumcarbid**	kg	100,00%	100,00%				
Repetierfaktoren	**Stahl (Sägedraht)**	kg	100,00%	100,00%				
Repetierfaktoren	**$Stickstoff_{fl}$**	g		1,96%				
Repetierfaktoren	**$Wasserstoff_{fl}$**	kg	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%		

Wie der Tabelle 5-15 ostensiv zu entnehmen ist, besteht eine deutliche Abhängigkeit des idealisierten maximalen Einsparpotenzials vom brancheninternen Rezyklierungspunkt innerhalb der Produktionssequenz eines $gSSM_{sc/mc}$. Dies zeigt sich besonders auffällig in der Quantität der stofflichen Einsparpotenziale, welche sich ausgesprochen stark

zwischen der Wiederverwendung und der Wiederverwertung unterscheiden. Grund hierfür ist die Umgehung der materialintensiven Anpassung der Kristallqualität und der Wafervereinzelung bei der Wiederverwendung. Eine weitere Abhängigkeit besteht bei den energetischen Einsparpotenzialen. Wenngleich die enorme Differenz der potenziellen energetischen Einsparungen zwischen der Wiederverwertung als SGS_p und als MGS im energieintensiven Raffinationsprozess begründet liegt, ist deren Abweichung zwischen der Wiederverwertung als SGS_p und der Wiederverwendung als kristalliner Siliziumrohwafer auf den hohen stofflichen Verlust während des Teilschrittes der Wafervereinzelung zurückzuführen. Abschließend lässt sich folglich festhalten, dass die Wiederverwertung der Altzellen als SGS_p gegenüber der Wiederverwertung als MGS durch ein höheres energetisches Einsparpotenzial gekennzeichnet ist, wohingegen die Wiederverwendung die Wiederverwertung generell ob des in der Produktionssequenz späteren Rezyklierungspunktes sowohl hinsichtlich der energetischen als auch der stofflichen Einsparpotenziale deutlich dominiert. Zudem besitzen auf Basis der wiederverwendeten Rohwafer produzierte kristalline Siliziumsolarzellen, wie bereits mehrfach aufgeführt, mindestens gleichwertige Wirkungsgrade[158]. Sie erfüllen demnach in Gänze die brancheninternen qualitativen Vorgaben. Dies gilt gleichwohl für die Wiederverwendung der Aluminiumrahmung und des Frontscheibenglases, welche zusätzlich den geforderten Dimensionierungen nachkommen. Dies kann eine Wiederverwertung per Definition nicht leisten, weshalb wiederverwertete Fraktionen geringere Verkaufserlöse zeitigen müssen.

Wird hingegen eine Weiterverwendung beziehungsweise -verwertung angestrebt, können sich die brancheninternen Nachteile einer Verwertung indessen als Chancen darstellen. Dafür sind jedoch qualitativ hochwertige Verwertungsverfahren notwendig, die eine ausreichende Trennung der Outputfraktionen generieren. Hierzu zählt zuvörderst das speziell dem idealisierten Fall des Recyclings zur Verwertung zugeordnete Recyclingverfahren der LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG. Die Zerstörung der brancheninternen Spezifika bezüglich der Dimensionierung stellt branchenextern keine Qualitätseinbuße dar, sondern kann aufgrund der Granulatform der Einzelfraktionen einen Vorteil hin zur Erschließung branchenexterner Absatzmärkte zeitigen; ob der Granulatform eröffnet

[158] Alternativ und dem technologischen Fortschritt Rechnung tragend lässt sich darüber hinaus festhalten, dass eine Solarzelle auf Basis eines recycelten Wafers im Gegensatz zu ihrem „ersten Lebenszyklus“ sogar einen wesentlich höheren Wirkungsgrad ob eines fortschrittlichen Zellendesigns und der Fertigung mittels moderner Produktionstechnologie besitzt. Aus rein technologischer Perspektive kommt es sonach zu einer Aufwertung infolge des Recyclings.

sich ein breiteres Einsatzspektrum weiterverwerteter Materialien als bei deren Weiterverwendung. Nebstdem gilt grundsätzlich: Je reiner die Einzelfraktionen sind, desto höher sind gemeinhin die möglichen Absatzerlöse. In der vorliegenden Arbeit werden die Effekte einer Weiterverwendung und -verwertung zudem nicht als Einsparpotenziale, sondern vielmehr als Substitutionspotenziale der entsprechenden Materialien im jeweiligen Anforderungsprofil angesehen. Analog der Ermittlung der regionalen Rohstoffpotenziale, wie in Tabelle 5-9 auf Seite 458 für die Region Sachsen samt Anrainer inklusive Berlin ausgegeben, können für beliebige Beispielregionen direkt solche stoffbezogenen Substitutionspotenziale berechnet werden. Grundlegende Annahme ist dabei jedoch ein nahezu verlustfreies Verwertungssystem. Sind dennoch stoffliche Einzelverlustraten spezifischer Verwertungsverfahren bekannt, können diese als Korrekturfaktor unmittelbar in die Berechnung multiplikativ einfließen.

Branchenextern zeigt sich sonach definitionsgemäß nur eine reduzierte Abhängigkeit von etwaigen Rezyklierungspunkten. Vielmehr besteht ein Zielkonflikt zwischen notwendiger absatzmarktabhängiger Reinheit der verwerteten Einzelfraktionen und Kosten der Recyclingverfahren. Wie bei der Diskussion um die einzelnen Verfahren bereits aufgezeigt, sind nach Tabelle 5-10 und dem Kapitel 5.3.5 jedoch bereits stoffübergreifende Reinheiten von 4N ohne spezifische Verfahrensanpassungen gängig. Folglich wird dieses Kriterium durch den Preisdruck dominiert, welcher sowohl von den Recyclingkosten selbst als auch von den Rohstoffpreisen der neuproduzierten Pendants der einzelnen Outputstoffströme abhängig ist. Eine vertiefende und qualitative Diskussion jener Diskrepanzen ist an dieser Stelle wiederum nicht möglich – schlicht der bislang nicht existenten oder nicht öffentlich zugänglichen Daten halber. Gleichwohl muss an dieser Stelle auf eine zum Produktionskapitel analoge Übersicht vorhandener oder betriebener Recyclingkapazitäten kristalliner Siliziumsolaraltmodule verzichtet werden, da derzeit simpliciter kein hochwertiges Recyclingverfahren[159] für $gSSM_{alt}$ großtechnisch betrieben wird.

[159] Im Sinne der vorliegenden Arbeit wird der bereits beschriebenen Status quo der Altmodulbehandlung nicht als hochwertiges Recyclingverfahren angesehen.

Aus ökologischer Sicht bleibt festzuhalten, dass ein hochwertiges Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule die Menge energieintensiv und emissionsreich produzierter Primärmaterialien zu verringern vermag und sonach laut [Hahne und Hirn 2010] die ökologischen und wirtschaftlichen Kenndaten kristalliner Siliziumsolarmodule verbessern kann. Zudem sind nach [Fischer *et al.* 2012, Seite 24]: „Aus ökologischer Sicht […] lediglich die verwendeten Ätzlösungen zu bemängeln, da diese teilweise toxisch [sic!] und somit bei unsachgemäßer Handhabung eine Gefahr für die Umwelt darstellen könnten."

Zusammenfassend zeigt sich folglich, dass ein hochwertiges Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule sowohl zur Verwendung als auch zur Verwertung aus technologischer Sicht bereits mittels vieler unterschiedlicher Ansätze unproblematisch durchführbar ist. In der Konsequenz ufert diese Erkenntnis jedoch in den Fragen: Warum wird der Status quo der Altmodulbehandlung derzeit als downcycling betrieben und was sind die verantwortlichen Hemmnisfaktoren?

5.4 Ökonomische Aspekte

Dieses Kapitel soll einen theoretischen Diskussionsansatz liefern, der auf die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit etwaiger betrachtungsrelevanter Recyclingaktivitäten abzielt und in Anlehnung an die Erkenntnisse des direkt vorbezeichneten Unterkapitels den Fokus sonach auf die Adressierung von Fragen legt, die die Rahmenbedingungen eines möglichen ökonomisch tragfähigen Recyclingkonzeptes für kristalline Siliziumsolaraltmodule zum Gegenstand haben. Essenzieller Charakter kommt dabei der Bewertung der derzeitig vorherrschenden Rahmenbedingungen hinsichtlich der Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit jener potenziellen Recyclingaktivitäten zu. Gleichwohl stellt die Suche nach den spezifischen Hemmnisfaktoren für die aufgedeckte gegenwärtige Disproportionalität zwischen dem Stand der zur Verfügung stehenden hochwertigen verfahrenstechnischen Lösungsansätze und deren industriellen Anwendung einen zentralen Aspekt dieses Kapitels dar. Darauf aufbauend schließt sich in der Konsequenz ein Diskurs über die desideraten Voraussetzungen für einen Übergang vom Downcycling als Status quo der Behandlung kristalliner Siliziumsolaraltmodule hin zu hochwertigen Recyclinglösungen an, wobei die notwendige Bedingung der technischen Durchführbarkeit auf Basis der bisherigen Erkenntnisse als gegeben angesehen wird.

Diskussionsgrundlage dieser Thematik sind letztlich gezielte Überlegungen zu einzelnen ökonomischen Restriktionen. Diese beinhalten neben der Frage nach einem kritischen Mindeststrom regional kontinuierlich zur Verfügung stehender kristalliner Siliziumsolaraltmodule besonders die Reflexion von Kosten- und Leistungsaspekten, denen nicht zuletzt die Untersuchung von und kritische Auseinandersetzung mit Grenzwerten obliegt. Folglich werden sowohl Restriktionen, die sich aus Grenzbetrachtungen ergeben, als auch die Auswirkungen potenzieller imponderabler Abweichungen thematisiert.

Wenngleich die Verkaufserlöse der mittels einer Recyclingaktivität generierten Sekundärrohstoffe eine untere Schranke zur Deckung der entstehenden Kosten nicht unterschreiten dürfen, sind sie an eine obere Schranke gebunden: die Marktpreise. Um Absatz am Markt zu finden, ergibt sich in Abhängigkeit der verfahrensspezifisch erzielbaren Reinheitsgrade sonach für jede Outputfraktion ein Maximalwert. Zudem kann sich eine bisweilen außerhalb dieser Schranken liegende Recyclingaktivität infolge einer Verteuerung der Primärrohstoffpreise auf ein bestimmtes Niveau indessen zukünftig als rentabel erweisen.

Bei umgekehrter Betrachtungsweise kann dahingegen die Kostenseite untersucht werden; mit ähnlicher Zielsetzung. So lassen sich exemplarisch bei einem gegebenen Preisniveau für den Absatz der Outputfraktionen wiederum gedankliche Maximalbereiche einzelner Kostenrubriken für den wirtschaftlich lohnenden Einsatz potenzieller Recyclingverfahren diskutieren. Diese rubrizierten Kosten werden dabei immer in aggregierter Weise betrachtet und umfassen neben Kosten, die direkt dem Recyclingverfahren entspringen, beispielshalber auch Sammel- und Transportkosten.

In toto stellt der theoretische Betrachtungsansatz mittels des Konzeptes des Break-even den zentralen Aspekt dieses Unterkapitels, da das Formalziel der Gewinnerwirtschaftung und damit der Sicherung des Unternehmensbestandes ein vorrangiges Ziel des Gros der konstitutiven Geschäftstätigkeiten darbietet; denn nur ein ökonomisch tragfähiges Recyclingkonzept (auch im Zuge des gezielten Einsatzes von ordnungsrechtlichen oder marktorientierten Instrumenten sowie wirtschaftspolitischen Eingriffen) wird sich realiter auf Dauer durchsetzen.

5.4.1 Einführende Betrachtungen und Funktionsherleitung

Basis der theoretischen Betrachtung etwaiger Grenzschwellen der Wirtschaftlichkeit von potenziellen Recyclingaktivitäten mittels des Break-even-Ansatzes stellt die mathematische Gegenüberstellung der im allgemeinen als bewertete Faktorverbräuche beziehungsweise -gebräuche und der damit erzeugten betrieblichen Ausbringung dar: sprich, der Vergleich der erzielbaren Leistungen und der dafür notwendigen Kosten. Im jeweiligen Gleichgewicht beider Stromgrößen ergibt sich für die zugehörigen unterschiedlichen Einzelbeiträge ein Schnittpunkt, welcher in der Fachliteratur mit Break-even bezeichnet wird. Diesem Gleichgewichtspunkt entspricht folglich in Abhängigkeit der Blickrichtung per Definition die Gewinn- oder Verlustschwelle der betrachteten unternehmerischen Aktivität. Obwohl die Parität der Leistungen und der Kosten für festgelegte Rahmenbedingungen lediglich einen Schnittpunkt erzeugt, kann das Konzept des Break-even auch als die Summe aller sich aus etwaigen Leistungen und Kosten ergebenden Gleichgewichtspunkten verstanden werden, sodass sich in der Konsequenz eine quasistetige Funktion beschreiben lässt. Jene resultierende Funktion ist sonach die Summe aller möglichen Wertepaare der beiden Stromgrößen, die die Definition des Break-even erfüllen.

Für den vorliegenden Fall kann dieses Gleichgewicht jedoch ob der bereits des Öfteren betonten defizitären Datenlage initial nur auf theoretischer Ebene diskutiert werden, woran sich in den betreffenden Unterkapiteln iterative Lösungsnäherungen supplieren können. Gleichwohl sind zuvörderst nachstehende Einschränkungen zu treffen, welche für sämtliche subsekutiven Kapitel bindend sind:

- Im Fokus der Betrachtung steht vorerst der „laufende“ Betrieb der entsprechenden Recyclingaktivität für kristalline Siliziumsolaraltmodule. Bis auf die zusammenfassende Betrachtung im Kapitle 5.4.5 werden dieserhalb keine initialen Ausgaben für beispielshalber Grundstücke, Anlagen et cetera mit einkalkuliert.
- Es wird der pagatorische Kostenbegriff zugrunde gelegt. Demnach erhalten nur Kosten Einzug, die direkt mit Auszahlungen verbunden sind. Dies gilt analog für die Leistungsseite. Ergo sind nur die tatsächlich zahlungswirksamen Vorgänge Betrachtungsgegenstand. Nach den Grundsätzen der Pagatorik erfolgen sämtliche Berechnungen und Schätzungen zudem unter Absenz von beispielshalber kalkulatorischen Kosten, Abschreibungen sowie Opportunitätskosten.
- Es handelt sich in Gänze um annuelle Betrachtungen, was einer Periodisierung der zahlungswirksamen Vorgänge entspricht.
- Economies of Scope (Verbundeffekte), die, sofern für hochwertige Lösungen technologisch überhaupt möglich, im Zuge einer Mitbehandlung anderer Technologien als Verfahrensinput für die jeweilige Recyclingaktivität mit einhergehen könnten, werden aus der Betrachtung exkludiert.
- Das gedankliche „Überschreiten“ der durch den Break-even definierten pagatorischen Gewinnschwelle soll der notwendigen Bedingung für die langfristige Existenz etwaiger betrachtungsrelevanter Recyclingaktivitäten entsprechen. Wenngleich die dafür obligaten Ausgangskosten nicht mitbetrachtet werden, stellt die Gewinnerwirtschaftung in der stetigen Phase des operativen Geschäftes sonach das theoretische Initiierungskriterium der Aktivität dar.
- Bei den Erlösen aus dem Verkauf der generierten Sekundärrohstoffe und Materialien handelt es sich um proportionale Erlöse. Gleiches gilt für die Beschaffungskosten des Prozessinputs. Eine abschnittsweise Rabattstaffelung wird nicht mitbetrachtet.
- Etwaige Lernkurveneffekte bleiben ingleichen unberücksichtigt.

- Grundlage bildet die Strategie der Emanzipation; Synchronisationsstrategien entfallen. Das bedeutet, dass je Recyclingaktivität ein gleichbleibendes und vom Markt unabhängiges Kapazitätsangebot vorherrscht.
- Intensitätsmäßige und zeitliche Anpassungen der Recyclingprozesse werden ebenfalls nicht in die Betrachtung mit eingeschlossen. Lediglich quantitative Anpassungen auf Gesamtaktivitätsebene sind an gegebener Stelle von Relevanz. Dabei gelten für jede zusätzliche Recyclingaktivität alle hier eingeschränkten Rahmenbedingungen und Annahmen in gleichem Maße.

Diesen Einschränkungen entsprechend kann eine Gleichung für die Gesamtheit aller möglichen Break-even-Punkte hergeleitet werden. Per Definition sind hierfür sämtliche aus dem laufenden Betrieb einer betrachtungsrelevanten Recyclingaktivität erzielbaren Erlöse jeweils den zur Parität zugehörigen maximal erlaubten pagatorischen Kosten gegenüberzustellen. Es kann vereinfachend angenommen werden, dass sich die erzielbaren Erlöse aus der Multiplikation der Anzahl der recycelten Altmodule mit den aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ realisierbaren Einzelerlösen ergeben, wobei die realisierbaren Einzelerlöse wiederum aus der Summe aller etwaigen rezyklierten Ingredienzien eines $gSSM_{sc/mc}$ multipliziert mit deren Marktpreisen, welche von der verfahrensspezifisch erzielbaren Reinheit abhängig sind, resultieren. Es gilt folglich:

$$Erlöse = \sum_{i=1}^{n} (P_i * I_i) * x \qquad \textbf{Formel 5-2}$$

mit P_i als Bewertung der aus den Ingredienzien I_i realisierten vermarktungsfähigen Outputs zu Marktpreisen, wobei der Index *i* alle mit dem zugrunde liegenden Verfahren und aus den Ingredienzen eines $gSSM_{alt}$ generierbaren verkaufsfähigen Outputfraktionen umfasst. Die Variable *x* steht für die Anzahl recycelter kristalliner Siliziumsolaraltmodule innerhalb eines Jahres.

Die Kostenseite begreift in oberster Ebene alle für das Recycling eines $gSSM_{alt}$ obligaten periodisierten und pagatorischen Kosten als Gesamtkosten ein. Dieserhalb werden die Gesamtkosten in die aggregierten Rubriken Verfahrenskosten (*VK*), Sammel- und Transportkosten (*TK*) sowie sonstige Kosten (*SK*) segmentiert. Jede Rubrik selbst impliziert zudem wiederum einen variablen und eine fixen Kostenanteil, welche nachfolgend jeweils mit den Indizes (*v*) für variabel und (*fix*) für fix gekennzeichnet werden. Gleichwohl ist jeder Kostenterm über die Variable *x* multiplikativ mit seinem

Stückkostenpendant (*Vk*) respektive (*Tk*) und (*Sk*) verknüpft. Die Kostenseite kann demnach äußerlich variieren oder beliebige Mischformen annehmen, wie beispielshalber:

$$Kosten = \underbrace{\left(Vk_V * x + VK_{fix}\right)}_{VK} + \underbrace{\left(Tk_V * x + TK_{fix}\right)}_{TK} + \underbrace{\left(Sk_V * x + SK_{fix}\right)}_{SK} \qquad \textbf{Formel 5-3}$$

Welche einzelnen Kosten den jeweiligen Kostenrubriken zugeordnet sind, ist den zugehörigen Unterkapiteln 5.4.3.1 und 5.4.3.2 zu entnehmen, wobei den Transportkosten indessen eine Sonderstellung zuzuschreiben ist. Gleichwohl muss bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die Rubrik der sonstigen Kosten nolens volens mit in die Rubrik der Verfahrenskosten inkludiert und sonach auch im entsprechenden Unterkapitel mitdiskutiert wird. Für die Parität der Kosten und der Erlöse ergibt sich aus der Gleichsetzung der Formeln 5-2 und der reduzierten Formel 5-3 die gesuchte Gleichung zur Beschreibung aller möglichen Break-even-Punkte zu:

$$\sum_{i=1}^{n} (P_i * I_i) * x = \left(Vk_V * x + VK_{fix}\right) + \left(Tk_V * x + TK_{fix}\right) \qquad \textbf{Formel 5-4}$$

Die Formel 5-4 soll sich nunmehr in den subsekutiven Unterkapiteln zur Erläuterung der einzelnen Terme als Diskussionsbasis darbieten. Übergreifende Effekte und etwaige Korrelationen der einzelnen Terme sind Gegenstand des zusammenfassenden Kapitels.

5.4.2 Erlösseite

Wie der Formel 5-4 entnommen werden kann, setzt sich die Erlösseite alleinig aus der Formel 5-2 und den darin enthaltenen Termen zusammen. Wenngleich in Formel 5-2 infolge der Herleitung der Formel 5-4 die Gesamterlöse aus der Multiplikation der realisierbaren Einzelerlöse mit der Anzahl recycelter Altmodule hervorgehen, kann die zu untersuchende Erlösseite mengenbefreit werden. Hierfür ist Formel 5-4 beidseitig durch *x* zu dividieren, was im Resultat ob der Mengenbefreiung die Möglichkeit der Diskussion der Erlösseite in Form von Einzelerlösen zeitigt. Wie bereits beschrieben, setzen sich die aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ erzielbaren Einzelerlöse aus der Summe der mit ihren Marktpreisen bewerteten (in Abhängigkeit der Reinheiten) und mittels des zugrunde liegenden Recyclingverfahrens generierten absatzfähigen Outputfraktionen zusammen. Die aus der Mengenbefreiung der Erlösseite resultierende Gestalt der Gesamtfunktion ist an dieser Stelle nicht relevant, weshalb von deren Darstellung abgesehen wird.

5.4.2.1 Marktpreise und resultierender Einzelerlös

Die potenziellen Einzelerlöse, die sich aus dem Verkauf sämtlicher, mittels eines Recyclingverfahrens generierbaren und absatzfähigen Outputfraktionen ergeben, variieren folgerecht mit der eingesetzten Technologie weil sowohl in der Quantität der Einzelströme als auch in deren Qualität (Reinheit) verfahrensabhängig. Neben der Kenntnis der unterschiedlichen verfahrensspezifischen Outputfraktionen stellen die realisierbaren Reinheiten der Outputfraktionen sonach eine notwendige Bedingung zur Ermittlung etwaiger Einzelerlöse aus dem Recycling eines kristallinen Siliziumsolaraltmoduls dar. Das einzige Verfahren, für das die entsprechenden Daten zugänglich oder bekannt sind (vergleich hierzu die Ausführungen des Kapitels 5-4), ist das im Kapitel 5.3.2 ab Seite 464 beschrieben Recyclingverfahren der SolarWorld AG. Im besagten Kapitel findet sich neben Diskussionen rund um die grundlegende Verfahrenssequenz, die Leistungsfähigkeit sowie den Spezifika auch eine detaillierte Übersicht (Tabelle 5-10, Seite 470) der möglichen Ausbeuten und der benötigten Daten zu den mittels jener Verfahrenssequenz erzielbaren Reinheiten. Für etwaige Vergleichszwecke wird je nach Bedarf das im Kapitel 5.3.5 beschriebene Recyclingverfahren der LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG herangezogen, da einerseits zumindest Schätzwerte zu den erzielbarer Reinheiten existieren (wenngleich es sich dabei lediglich um firmeneigene Angaben handelt) und andererseits durch den Einsatz der Kryotechnologie als definitionsgemäßes Verwertungsverfahren ein Gegenstück zum Recycling zur Verwendung Beachtung findet, welches zudem hohe Reinheiten der Outputfraktionen gewährleistet.

Die bereits in der Tabelle 5-10 aufgeführten Werte bilden dementsprechend die Basis zur nachfolgenden Ermittlung der erzielbaren Einzelerlöse aus dem Recycling eines kristallinen Siliziumsolaraltmoduls zur Verwendung, wobei sich ob der Spezifik des Recyclingverfahrens der SolarWorld AG selbst die Möglichkeit einer Fallunterscheidung hinsichtlich der Outputfraktion Siliziumsurrogat eröffnet. Den detaillierten Ausführungen des entsprechenden Kapitels folgend, kann die Outputfraktion Silizium sowohl als Waferbruch in SGS-Qualität als auch in Form polierter kristalliner Siliziumrohwafer sowie als Wafer der Spezifikation „p-dotierter, texturierter, kristalliner Siliziumwafer“ anfallen. Je nachdem, welche der drei Charakteristiken dem Silizium als Prozessoutput obliegt, ergeben sich neben Verfahrensvariationen, welche nicht zuletzt in unterschiedlichen Kosten ufern und verschiedene Ausbeuten generieren, auch voneinander abweichende potenzielle Absatzerlöse weil mit ungleichen Marktpreisen zu bewerten.

Von der Diskussion der erzielbaren Einzelerlöse für die Verfahrensspezifikation zur Generierung des im Vorangegangenen als Premiumprodukt bezeichneten Outputs der Form „p-dotierter, texturierter, kristalliner Siliziumwafer“ wird allerdings abgesehen. Dies begründet sich darin, dass die Preise für benannte Outputvariante nicht nur von der Reinheit abhängig sind. Die realisierbare Preisspanne hängt von mehreren Kriterien ab, die beispielshalber die Beschaffenheit der Oberflächenstruktur, die Anzahl an Fehlstellen in der Texturierung und enthaltene Mikrorisse et cetera umfassen. Gleichwohl stellen verschiedener Hersteller von kristallinen Siliziumsolarzellen unterschiedliche Anforderungen an einzelne Eigenschaften jener Outputfraktion des Recyclingprozesses. Es würde sich folglich in toto um Einzelfallanalysen handeln, wohingegen der Output in Form polierter kristalliner Siliziumrohwafer den brancheninternen Massenmarkt bedient; der Output als Waferbruch in SGS-Qualität sogar branchenexternen Einsatz finden kann. Im Sinne der Vergleichbarkeit der Verfahrenskosten und Erlösstrukturen werden beide letztgenannten Outputvarianten dem Recyclingverfahren der SolarWorld AG zugeordnet. Zudem kann das Vergleichsverfahrens der LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG als reines Verwertungsverfahren definitionsgemäß keine Wafer liefern, wohingegen sich das Verfahren der SolarWorld AG mit einer lässlichen Anpassung der Recyclingsequenz (Einbezug eines Zerkleinerungsprozesses) ohne nennenswerten Mehraufwand in ein Verwertungsverfahren per Definition transformieren lässt. Allerdings sind hierfür keine erzielbaren Reinheiten und Ausbeuten bekannt. Dem Kapitel 5.3 nach können jedoch ähnliche Werten wie für das Vergleichsverfahren angenommen werden.

In Abhängigkeit der zugrunde liegenden Verfahrenssequenz nach Kapitel 5.3.2 ergeben sich für das Recycling zur Verwendung von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen die in der nachstehenden Tabelle 5-16 aufgeführten absatzfähigen Outputfraktionen I_i je behandelten Altmodul, welche mit den gängigen Marktpreisen P_i bewertet wurden. Im Falle der Fraktion Siliziumrohwafer wird zudem zwischen monokristallinen (sc) und multikristallinen (mc) Wafern unterschieden. Quellen der Tabelle 5-16 sind für die Spalte Input je $gSSM_{alt}$ die Tabelle 4-28, für die stoffspezifische Ausbeute und die zugehörige Reinheit die Tabelle 5-10. Bei der Spalte der Marktpreise ist je Fraktion zu differenzieren. Im Falle von Glas sind die Hauptquellen [Pacholke 2016] sowie [Enkhardt 2014], für die Siliziumrohwafer und den Siliziumbruch [ECO-MC GmbH 2016], [PVinsights Co., LTD 2017] sowie [Cellere *et al.* 2016] und [Kreutzmann 2016], für Kupfer die Börsenpreise und im Falle der verwendeten Aluminiumlegierung [Smith 2017].

Tabelle 5-16: Einzelerlöse und potenzieller Gesamterlös aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ zur Verwendung.

Potenzieller Erlös aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ zur Verwendung		**Input je $gSSM_{alt}$**	**Ausbeute**	**Verwendbarer Output je $gSSM_{alt}$**	**Reinheit**	**Marktpreis**	**Einzelerlös je recyceltem $gSSM_{alt}$**
Fraktion	**Glas**	1,59732 m²	96,96 %	1,5487[a] m²	99,99975 %	5,50[b] €/m²	9,52 €
	Siliziumrohwafer	60 Stk	84,62[c] %	50 Stk	100,00 %	sc: 0,85 €/Stk mc: 0,60 €/Stk	sc: 42,50 € mc: 30,00 €
	Siliziumbruch	0,612 kg	16,667[d] %	0,102[d] kg	100,00 %	14,20 €/kg	1,45 €
	Kupfer	0,1805 kg	77,78 %	0,1404 kg	100,00 %	5[e] €/kg	0,70 €
	Aluminiumlegierung	1 Set	100,00 %	1 Set[f]	100,00 %	8 €/Set	8,00 €
					potenzieller Gesamterlös:		**(sc) 62,17 €** **(mc) 49,67 €**

Legende:

Hochgestellte Indizes: [**a**] → Wenngleich eine von 100 % abweichende Ausbeute bei einem Recycling zur Verwendung von einzelnen Modulen für vollflächige Glasplatten definitionsgemäß keine Verwendung von Glasbruchstücken zulassen würde, kann die Ausbeute infolge der mengenabhängigen Skalierung bezüglich der Erlösermittlung gedanklich auf die Flächenanteile projiziert werden.

[**b**] → Laut [Enkhardt 2014] liegt die charakteristische Marktpreisspanne in Abhängigkeit der gewünschten Spezifikationen zwischen 6 und 8 €/m² Solarglas, bestätigt durch [Pacholke 2016]. Der Ermittlung des Einzelerlöses aus der Vermarktung dieser Outputfraktion wird dahingegen ein durchschnittlicher Marktpreis nahe der unteren Preisschranke (6 €/m²) von 5,50 €/m² zugrunde gelegt, da teilweise von geringen Qualitätsmängeln infolge des Gebrauchs (Kratzer, Diffusion von Silber-, Aluminium- oder sonstigen Atomen et cetera) ausgegangen werden kann und [Enkhardt 2014] zudem bis 2018 einen stabilen Marktpreis knapp unter 6 €/m² prognostiziert.

[**c**] → Der entsprechende Ausschuss fällt als Siliziumbruch an.

[**d**] → Die Ausbeute ergibt sich aus dem tatsächlichen Ausschuss der Siliziumrohwafer von 10 Wafern je 60 Wafer zu rund 16,667 %. Der verwendbare Output je $gSSM_{alt}$ für die Fraktion Siliziumbruch berechnet sich aus der Anzahl der ausgesonderten Wafer multipliziert mit deren Einzelgewicht (reines Silizium) von 0,0102 g.

[**e**] → Ermittelt aus den durchschnittlichen Börsenpreisen der Jahre 2014 bis 2016, wobei aktuelleren Preisen eine höher Gewichtung zukommt.

[**f**] → Ein Set umfasst alle Teile einer Modulrahmung aus eloxiertem Aluminium. Die Ausbeute beträgt 100 %, da die Verfahrenstemperatur des thermischen Prozessschrittes von circa 550 °C unter dem Schmelzpunkt der Fraktion liegt.

Obzwar multikristalline und monokristalline Siliziumsolaraltmodule rein technologisch keine heterogenen Anforderungen an die Recyclingverfahren stellen, ergibt sich bei einem Recycling zur Verwendung aufgrund der enthaltenen unterschiedlichen Kristallqualitäten eine Differenz im jeweiligen potenziell erreichbaren Gesamterlös. Da sich jedoch laut Abbildung 4-17 auf Seite 203 (Kapitel 4.4) die Marktanteile beider Kristallqualitäten nur geringfügig zu Gunsten der multikristallinen Technologie unterscheiden, wird aus beiden potenziellen Gesamterlösen ein Durchschnittswert mit Tendenz zum sich aus dem Recycling eines multikristallinen Altmoduls ergebenden unteren Wert zu 55 € je $gSSM_{alt}$ gebildet. Allerdings sind die kristallspezifischen potenziellen Gesamterlöse stark vom Marktpreis der Rohwafer abhängig. Wie Abbildung 5-23 zu entnehmen ist, schwankte dieser für multikristalline Siliziumsolarrohwafer allein im Jahr 2016 zwischen rund 80 Cent und 45 Cent je Stück.

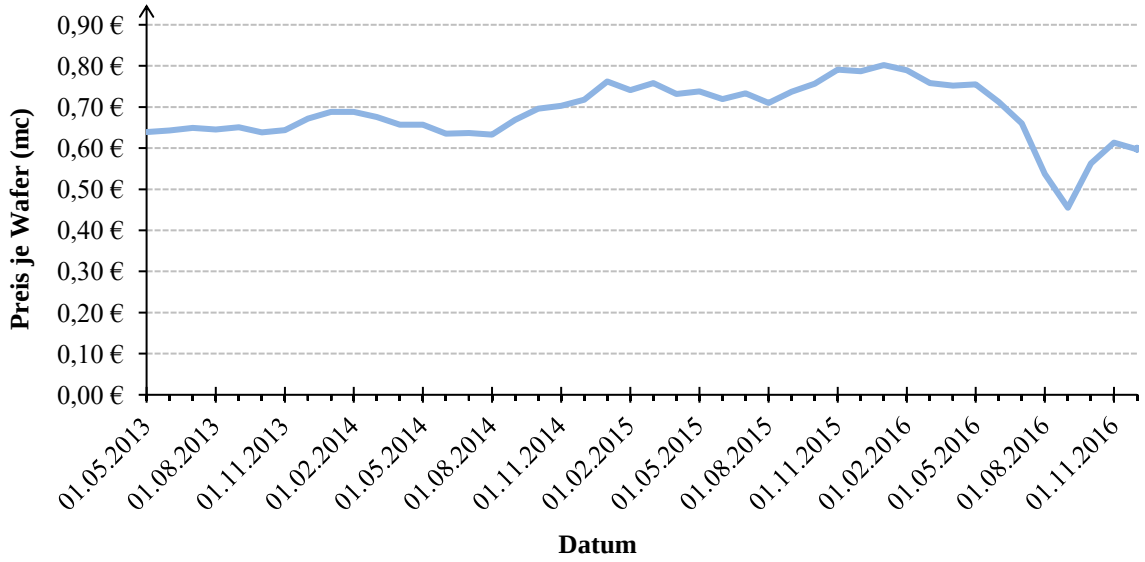


Abbildung 5-23: Marktpreis multikristalline Siliziumsolarrohwafer zwischen 01.05.2013 und 28.12.2016.

Laut [Cellere *et al.* 2016] und [Kreutzmann 2016] verhielt sich die Preisentwicklung der monokristallinen Wafer im gleichen Zeitraum ähnlich ihrer multikristallinen Pendants; jedoch auf einem höheren Niveau. Im Jahr 2016 schwankte der Marktpreis für monokristalline Siliziumsolarwafer zwischen rund 1 € je Stück und knapp 68 Cent je Stück. Diese Preisspitzen beider Kristallqualitäten lassen den kalkulierten Basiswert von 55 € Gesamterlös je recyceltem $gSSM_{alt}$ (kristallqualitätsübergreifend) um grob 15 % positiv und negativ schwanken. Für das Jahr 2016 hätte sich sonach alleinig ob der Schwankungen des Marktpreises für kristalline Siliziumsolarrohwafer eine Erlösspanne zwischen 46,75 € und 63,25 € für den potenziellen Gesamterlös ergeben. Die Preisschwankungen der Siliziumwafer sind jedoch wiederum selbst von den Preisen für SGS_p abhängig, welche im Jahr 2016 zwischen 11,30 € je kg und 15,23 € je kg lagen. Neben der Abhängigkeit der Waferpreise vom SGS_p-Preis wirkt sich dieser aber auch direkt auf den potenziellen Gesamterlös aus, da er sich in der Fraktion Siliziumbruch wiederspiegelt. Die direkte Abhängigkeit des potenziellen Gesamterlöses aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ zur Verwendung besteht zudem bei jeder vermarktungsfähigen Outputfraktion des Recyclingverfahrens. Wenngleich folglich die Schwankungen der Marktpreise aller Fraktionen einen Beitrag zur möglichen Schwankung des Gesamterlöses leisten, stellt der Waferpreis ob dessen wertmäßig ungleich hohem Anteil am Gesamterlös (~ 60,4 % im multikristallinen und ~ 68,4 % im monokristallinen Fall; jeweils bezogen auf den Basiswert) den Haupteinfluss dar. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt auch [Park *et al.* 2016]. In toto wird die Gesamtschwankung deshalb auf die Waferpreise für das Jahr 2016 reduziert, da sich die Einzeleffekte der Fraktionen auch gegenseitig abmildern

können. Allerdings zeigten sich einige Rohstoffpreise wie beispielshalber die Marktpreise für polykristallines SGS in der Vergangenheit höchlich volatil, was je nach absoluter Ausprägung mehr oder minder starke Auswirkungen auf den potenziellen Gesamterlös haben kann. Mögliche zukünftige Schwankungen sind jedoch imponderabel und können zudem sprunghaften Charakter aufweisen. Obschon dies mit der angegebenen Erlösspanne teilweise abgefangen werden kann, ist eine Abweichung zukünftiger realer Erlösspannen dahingegen weder vollends auszuschließen noch wertmäßig zu greifen. Dies ist umso prekärer, je volatiler sich die Marktpreise einer Fraktion verhalten oder je höher der Anteil am kalkulierten Basiswert des potenziellen Gesamterlöses ist. Die sich daraus ergebenden Abhängigkeiten des Gesamterlöses vom realen Verhalten der Marktpreise zeitigen dementsprechend einen enormen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit etwaiger Recyclingprozesse und haben zur Konsequenz, dass eine speziell ausgerichtete Recyclingtechnologie hier teils unkalkulierbaren Risiken unterliegt.

Dies trifft indessen nicht nur für das Recycling zur Verwendung zu, auch das Recycling zur Verwertung zeigt analoge Abhängigkeiten. Zum Vergleich der potenziellen Gesamterlöse führt nachstehende Tabelle 5-17 hierfür, angelehnt an die Darstellung der Tabelle 5-16, die Ergebnisse für das Recycling eines $gSSM_{alt}$ zur Verwertung auf. Im Gegensatz zur Berechnung der potenziellen Gesamterlöse aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ zur Verwendung werden zur Kalkulation der Erlöse aus dem Recycling zur Verwertung konsequent Masseneinheiten genutzt. Dies ist insofern auch richtig, als dass jedweder Prozessinput definitionsgemäß zerkleinert wird und sich sonach Flächen- oder Stückmaße ausschließen. Die Quelle der Spalte Input je $gSSM_{alt}$ stellt wiederum die Tabelle 4-28 dar und die aufgeführten Reinheiten sind an die Erkenntnisse der zugehörigen Kapitel 5.3.2 und 5.3.5 gebunden. Die der Kalkulation der Einzelerlöse zugrunde gelegten Marktpreise entstammen [Weckend *et al.* 2016], [Choi und Fthenakis 2014a], [La Mia Energia SCARL 2015a.], [Cucchiella *et al.* 2015], [Brellinger 2014] sowie den entsprechenden durchschnittlichen Börsenpreisen des Jahres 2016, wobei aktuelleren Preisen eine höhere Gewichtung zukommt.

Ingredienzien, die nicht in einer vermarktungsfähigen Reinheit als Output aus dem Prozess hervorgehen oder schlicht keinen Absatzmarkt besitzen, werden in diesem Zusammenhang mit dem Marktpreis null Euro je Mengeneinheit bewertet.

Tabelle 5-17: Einzelerlöse und potenzieller Gesamterlös aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ zur Verwertung.

Potenzieller Erlös aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ zur Verwertung		**Input je $gSSM_{alt}$**	**Ausbeute[a]**	**Verwendbarer Output je $gSSM_{alt}$**	**Reinheit**	**Marktpreis**	**Einzelerlös je recyceltem $gSSM_{alt}$**
	Einheit	kg	%	kg	%	€ je kg	€ je $gSSM_{alt}$
Fraktion	**Glas**	13,9766	98	13,697	99,99975	0,06	0,82
	Siliziumbruch	0,612	98	0,5997	100,00	14,20	8,52
	Kupfer	0,1805	77,78	0,140	100,00	5,00	0,70
	Aluminium[b]	2,69	98	2,636	100,00	1,55	4,09
	Silber[c]	0,006	98	0,00588	100,00[d]	520,00	3,06
				potenzieller Gesamterlös: 17,20 €/$gSSM_{alt}$[e], [f]			

Legende:

Hochgestellte Indizes: [**a**] → Bis auf Kupfer wird sowohl keine fraktionsspezifische Ausbeute als auch keine generell gültige 100 %-ige Ausbeute zugrunde gelegt, da zwar sehr hohe Reinheiten der einzelnen Fraktionen erzielbar sein sollen, die jeweiligen Ausbeuten, beziehungsweise die stofflichen Verluste oder die Entstehung etwaiger Mischfraktionen jedoch in den vorhandenen Quellen nicht berücksichtigt werden. Gleichwohl scheint eine 100 %-ige Ausbeute aller Fraktionen als unwahrscheinlich. Angesichts der erzielbaren Ausbeuten mittels des Vergleichsverfahrens, wonach laut firmeneigenen Angaben die in einem $gSSM_{alt}$ enthaltenen Metalle zu fast 100 % zurückgewonnen werden können, und der steten Fortentwicklung der Verfahrenstechnik wird dieserhalb für alle Einzelfraktionen (außer Kupfer) eine gemeinsame Ausbeute von 98 % angesetzt.

[**b**] → Summe aus vollflächigem Zellenrückkontakt und der Modulrahmung aus eloxiertem Aluminium.

[**c**] → Aufgrund des geringen Wertanteils der Silberfraktion beim Recycling zur Verwendung in Verbindung mit den Ausführungen der Kapitel 5.3.2 sowie 5.5.2.1 wurde bei der Ermittlung des potenziellen Gesamterlöses aus dem Recycling zur Verwendung auf diese Outputfraktion verzichtet. Mit sinkendem potenziellen Gesamterlös steigt jedoch die Attraktivität der Rezyklierung des Silberanteils, weshalb dieser Aspekt beim Recycling zur Verwertung Beachtung findet.

[**d**] → Der rückgewonnen Fraktion Silber wird in Anlehnung an die erzielbaren Reinheiten der vergleichbaren Fraktionen ebenfalls eine 100 %-ige Reinheit attribuiert. Zudem liegt die Fraktionen in einer chemischen Lösung vor, wodurch sie rein technologisch nahezu verlustfrei extrahiert werden kann.

[**e**] → Der Marktpreis von Blei betrug Ende des Jahres 2016 durchschnittlich 2 € je Kilogramm; der von Bismut lag bei circa 8,90 €/kg. Selbst wenn die gesamte Fraktion aus Bismut bestehen würde und sich der Bismutpreis zudem wiedererwartend verdoppeln würde, wäre der Einzelbeitrag dieser Fraktion am Gesamterlös vernachlässigbar klein. In diesem Falle würde der Einzelerlös bei weniger als einem Cent (circa 0,87 Cent) liegen. Ferner wäre der kalkulierte Wert dieser Mischfraktion von rund 0,3 Cent durch geringe Preisschwankungen der anderen Fraktionen deutlich überlagert. Dieserhalb wird diese Fraktion aus der Erlösbetrachtung exkludiert.

[**f**] → Die Fraktion Kunststoffe ist aufgrund der thermischen dreidimensionalen Vernetzung auch nicht mittels des Prinzips der kryogenen Verbundmaterialtrennung sortenrein aufzutrennen. Es würde eine Mischfraktion der drei Kunststoffe entsteht. Wenngleich der Marktpreis für sortenreines Polyethylenterephthalat als Mahlgut laut [New Media Publisher GmbH 2017] und [KunststoffWeb GmbH 2017] zwischen 0,30 und 0,35 € je kg liegt, muss der Wert der Mischfraktion entsprechend niedriger ausfallen weil zudem mit fluorhaltigen Kunststoffen „verunreinigt“. Für solche, mit Fluor verunreinigten Mischfraktionen ist derzeit kein Markt existent und wäre sonach kein entsprechender Marktpreis zu ermitteln.

Mit knapp 50 % bezogen auf den Basiswert stellt der erzielbare Einzelerlös aus der Fraktion Siliziumbruch einen ähnlich bemerkenswert hohen Anteil am Gesamterlös wie die Fraktion Siliziumrohwafer beim Recycling zur Verwendung. Zudem zeigte sich bereits im Kapitel 4.6.2 bei der Betrachtung der historischen Marktdaten von SGS_p, welche enormen Auswüchse die Spanne von Marktpreisen einzelner Fraktionen annehmen kann. Zur Kalkulation einer potenziellen Spanne des Gesamterlöses sollen jedoch jene imponderablen, sprunghaften und in ihren Auswüchsen ungleichen Spitzen keine Beachtung

finden. Ob des hohen Anteils am Gesamterlös bilden zu diesem Zwecke vielmehr die Amplituden der Preisschwankungen von polykristallinem SGS der Jahre 2014 bis 2016 die Berechnungsgrundlage, welche sich in der nachfolgenden Abbildung 5-24 finden. Das Maximum beträgt demnach 16,96 € je kg SGS_p, das Minimum 11,29 €/kg.

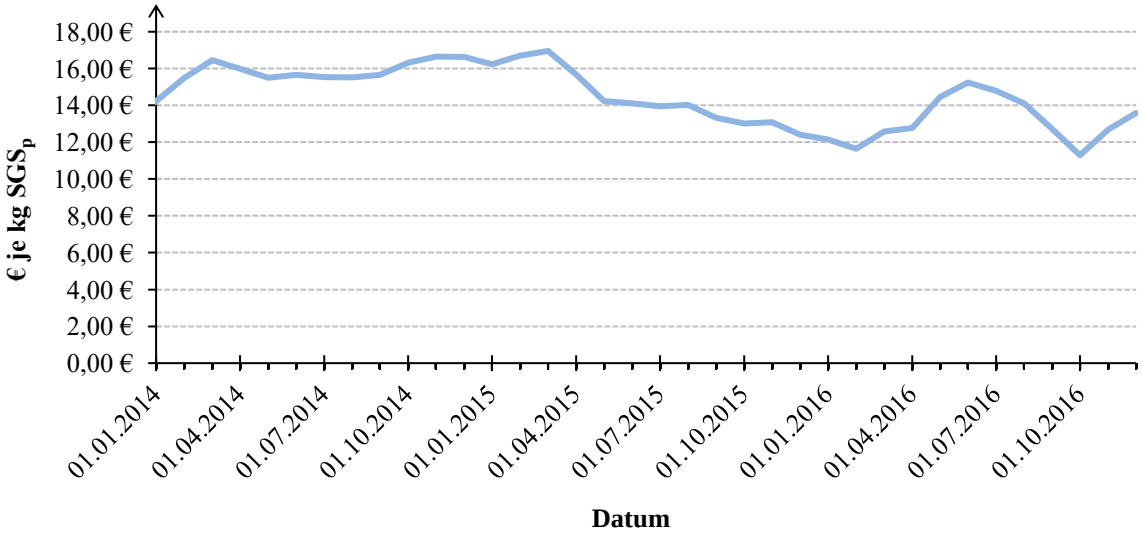


Abbildung 5-24: Marktpreis polykristallines SGS zwischen 01.01.2014 und 01.12.2016.

Diese beiden Preisspitzen lassen den kalkulierten Basiswert von 17,20 € des potenziellen Gesamterlöses je recyceltem $gSSM_{alt}$ um rund 10 % positiv und negativ schwanken. Es ergibt sich sonach eine Spanne des potenziellen Gesamterlöses in den Grenzen zwischen 15,45 € und 18,85 € je Altmodul. Wenngleich beim gewählten Beispiel des Recyclings zur Verwertung ebenfalls eine Fraktion einen wertmäßig bemerkenswert hohen Anteil am Gesamterlös (knapp 50 % bezogen auf den Basiswert) stellt, können auch andere Risiken aus den Schwankungen der Marktpreise entstehen, als die beim Recycling zur Verwendung beschriebenen. Sinken beispielshalber die Rohstoffpreise für Glas und Silizium am Weltmarkt, sinken dementsprechend auch die potenziellen Erlöse des Recyclers. Zum Ausgleich der Kosten müssten dann entweder die Gesamtkosten gesenkt oder die Durchsatzmenge entsprechend erhöht werden. Weiter können aufgrund sinkender Marktpreise einzelne Abnehmer von Sekundärrohstoffen wegbrechen, da diese ihren Prozessinput dann mit günstigeren Rohstoffen substituieren. Dies wiederum senkt letztlich die Attraktivität eines potenziellen Recyclingprozesses zusätzlich. Gleichwohl können neben sinkenden Marktpreisen auch anstehende Materialsubstitutionen in der Produktion kristalliner Siliziumsolarmodule die Absatzerlöse etwaiger Outputfraktionen aus dem Recycling schmälern, wenn aufgrund von Kostensenkungen günstigere Materialien in der

Produktion Einzug finden. Dies zeigt sich beispielshalber bei der industriell angestrebten Substitution des Silbers durch Kupfer. Für nähere Informationen darüber und weitere Diskussionen zu anstehenden Materialsubstitutionen wird an dieser Stelle auf das entsprechende Kapitel 5.5.2 verwiesen.

Wie bereits angedeutet, resultiert aus den Marktpreisen der einzelnen Materialien eine obere Schranke für den möglichen Absatzerlös der einzelnen Fraktionen beziehungsweise für den potenziellen Gesamterlös. Die tatsächlichen Preise für die Sekundärrohstoffe können bei kostendeckender Verfahrensweise auch entsprechend niedriger liegen, was sie für etwaige brancheninterne wie branchenexterne Absatzmärkte umso attraktiver erscheinen lässt. Neben der bereits ausführlich diskutierten ökologischen Komponente können sich so auch ökonomische Anreize für potenzielle Abnehmer ergeben.

5.4.2.2 Absatzmärkte Sekundärrohstoffe

Die mannigfaltigen Ansprüche der jeweiligen Absatzmärkte an die einzelnen Fraktionen aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ unterscheiden sich teils enorm. Zudem können geringfügige Qualitätseinbußen der Materialien entweder dazu führen, dass die Anforderungen spezifischer Absatzmärkte nicht mehr im geforderten Maße erfüllt werden können – diese aus dem potenziellen Absatzportfolio entfallen, oder mittels einer Reduzierung des Verkaufspreises Märkte erschlossen werden können, die bisweilen nicht im Fokus standen. Es stellt sich folglich nicht die Frage, für welchen der einzelnen Absatzmärkte welcher Verkaufspreis adäquat erscheint. Es bietet sich vielmehr eine Betrachtung ähnlich des Minimal-Maximal-Prinzips an, sprich:

- Welche Qualität ist zur Erschließung eines attraktiven Absatzmarktes bei welchen Preisstrukturen mindestens notwendig?
- Welche Märkte lassen sich bei gegebener Qualität der einzelnen Outputfraktionen zu welchen Preisen erschließen?

Wie bereits Tabelle 4-15 (Kapitel 4.5.2.2, Seite 233) und die zugehörige Diskussion zeigten, ergeben sich rein technologisch für neuproduziertes Silizium in SGS-Qualität zwar neben der Solarindustrie auch die Chipindustrie, die Aluminiumindustrie und die Silikonherstellung als potenzielle Absatzmärkte; bei einer kombinierten Perspektive aus technologischer und ökonomischer Betrachtung sind jedoch die Aluminiumindustrie und die Silikonherstellung aus dem Portfolio zu exkludieren. Dies hat vor allem ökonomische

Gründe. Der erzielbare Verkaufserlös von Silizium in SGS-Qualität am Absatzmarkt Aluminiumindustrie und zur Silikonherstellung würde deutlich niedriger ausfallen als in der Solar- oder Chipindustrie, da sich die spezifischen Qualitätsanforderungen der jeweiligen Absatzmärkte im Rohstoffpreis widerspiegeln. Gleiches gilt für das aus dem Recycling stammende SGS. Zur Bedienung der beiden Absatzmärkte Aluminiumindustrie und Silikonherstellung wäre Silizium in MGS-Qualität vollkommen ausreichend, wobei die Herstellungskosten von neuproduziertem MGS nur rund 1/10 der Herstellungskosten von SGS betragen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass an Absatzmärkten, die höhere Qualitätsanforderungen stellen, auch entsprechend höhere Verkaufserlöse generiert werden können; oder eine geringere Qualität der Outputfraktionen der Recyclingprozesse zur Erschließung bestimmter Absatzmärkte ausreichend ist, welche letztlich mit geringeren Verfahrenskosten der Recyclingprozesse erzielt werden kann. Sonach ergibt sich ein Trade-off zwischen notwendiger Qualität der einzelnen Fraktionen und der erzielbaren Einzelerlöse.

Bei einer angestrebten brancheninternen Rückführung spielen derartige Überlegungen zur Qualität der Sekundärrohstoffe indessen keine Rolle, da jedwede qualitative Verschlechterung der einzelnen Fraktionen ein Ausscheiden aus dem brancheninternen Markt nach sich ziehen oder nur mit erheblichen Erlöseinbußen einhergehen würde. Allerdings kann, bei Erfüllung aller anderen notwendigen Bedingungen, ein Preis unter Marktwert einen starken Anreiz zum Einsatz der Rezyklate für die Produzenten der entsprechenden Fertigungsstufe darstellen. Laut [Jones-Albertus *et al.* 2016] und [Bunner 2010, S. 159f] haben die Materialkosten einen Anteil von circa 55 % an den gesamten Produktionskosten eines $gSSM_{sc/mc}$. Ähnlich verhält es sich auf Ebene der Zellenproduzenten. Nach [Park und Park 2014] und [Kang *et al.* 2012] machen die Waferkosten ebenfalls rund 60 % der gesamten Produktionskosten einer kristallinen Standardsiliziumsolarzelle aus. Die Substitution einzelner Repetierfaktoren durch im Anschaffungspreis günstigere Sekundärrohstoffe kann sonach einen erheblichen Beitrag zur Senkung der Produktionskosten auf den einzelnen Fertigungsebenen und in der Konsequenz in der Modulfertigung zeitigen.

Wie bereits im Kapitel 5.2.2.2 angemerkt, ist der erzielbare Kostenvorteil bei einer Rezyklierung von Materialien aus dem Recycling zur Verwendung nicht alleinig darauf zurückzuführen, ob diese wieder- oder weiterverwendet werden, sondern auch auf welcher Stufe sie Einzug in die entsprechende Produktionssequenz erhalten. Dies wurde

am Beispiel der Wiederverwendung intakter Siliziumwafer verdeutlicht, wobei die globalen Auswirkungen auf die Produktionssequenz eines $gSSM_{sc/mc}$ auf der Senkung des SV_3 basieren. Darüber hinaus kann neben der resultierenden Kostenreduktion auch ein ökologischer Mehrwert generiert werden, dessen Höhe abhängig vom spezifischen Absatzmarkt und der entsprechenden Einbringungsstufe ist.

Die Komplexität der Betrachtung erhöht sich zudem, da eine strikte Trennung zwischen branchenexternen und brancheninternen Absatzmarkt mitunter nicht immer möglich ist – zumindest nicht, was den endgültigen Einsatz der einzelnen Outputfraktionen darstellt. Neben dem direkten Einsatz der recycelten Materialien kann ein Aufbereitungsprozess zwischengeschalten werden. Dies lässt sich am Beispiel des Modulfrontglases gut nachvollziehen. Wie bereits mehrfach beschrieben, besitzt infolge des Recyclings zur Verwendung die Frontscheibe das Potenzial in der Produktion neuer $gSSM_{sc/mc}$ wiederverwendet zu werden. Allerdings haben die meisten Modulhersteller voneinander abweichende Anforderungen an die einzelnen Kriterien der verschiedenen Glaseigenschaften. Ferner können die existierenden Recyclingansätze etwaige Beschädigungen wie Kratzer et cetera aus vorangegangenen Nutzungszyklen nicht beheben. Deshalb und zur Erfüllung der teils sehr speziellen Anforderungen einzelner Modulhersteller kann das rezyklierte Glas auch erst einen „branchenexternen Umweg“ über speziell ausgerichtete Glasveredelungsbetriebe nehmen, bevor es wieder in der brancheinternen Modulfertigung Einsatz findet. Dies würde jedoch wiederum zu geringeren Verkaufserlösen der entsprechenden Outputfraktion führen. Für die Wiederverwendung der Glasscheiben direkt aus dem Recycling oder mittels einer Aufbereitung sprechen der bisherigen Diskussion folgend die bereits übereinstimmenden und sehr spezifischen brancheninternen Anforderungen an die Geometrie, den Fremdstoffgehalt (beispielsweise den Eisengehalt) und die thermische Vorspannung. Gleichwohl sind infolge dieser sehr speziellen Eigenschaften des Glases aber auch neue Anwendungsfelder, wie beispielshalber der Gewächshausbau, adressierbar.

Eine detaillierte Untersuchung aller eventuell branchenexternen Absatzmärkte sowohl für das Recycling zur Verwendung als auch für das Recycling zur Verwertung ist ob der immensen Anzahl von Möglichkeiten schlicht nicht sinnhaft und ließe sich zudem nicht vollumfänglich darstellen. Zusammenfassend lässt sich letztlich jedoch festhalten, dass sofern ein Recycling zur Verwendung Anwendung findet, eine Wiederverwendung zu fokussieren ist. Dies begründet sich besonders in den bereits im Kapitel 5.3.9 ausführ-

lich diskutierten stofflichen sowie energetischen Einsparpotenzialen (vgl. Tabelle 5-15, Seite 506) und etwaigen darauf basierenden ökologischen und ökonomischen Effekten. Auf betriebswirtschaftlicher Ebene lässt sich ein möglicher ökonomischer Mehrwert im Falle des Recyclers auf hohe Verkaufserlöse und im Falle eines Produzenten auf sinkende Materialkosten simplifizieren. Volkswirtschaftlich ergibt sich darüber hinaus ein vom generierbaren ökologischen Mehrwert nicht überschneidungsfreies Potenzial, welches wiederum ein breites Diskussionsspektrum liefert. Dieser Aspekt erscheint jedoch für den aktuellen Passus als nicht zielführend, weshalb an dieser Stelle auf das Kapitel 6.5 verweisen wird. Neben den eigentlichen und direkt greifbaren ökologischen und betriebswirtschaftlichen Potenzialen, die eine Rezyklierung einzelner Fraktionen aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ nach sich ziehen kann, können unabhängig des jeweiligen Absatzmarktes auch weitere Effekte entscheidende Aspekte für den tatsächlichen Einsatz einzelner recycelter Materialien gebieten. Deren essenzielles Wesensmerkmal ist zwar ökologischer Natur, in letzter Konsequenz ergeben sich jedoch wiederum Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit. So beeinflusst der Einsatz von Materialien aus recycelten $gSSM_{alt}$ die Ökobilanz von daraus gefertigten Produkten und ist dementsprechend auch für ein zielgerichtetes Marketing geeignet. Daraus ergibt sich auch die Möglichkeit einzelne Outputfraktionen aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ geringfügig über dem durchschnittlichen Marktwert zu vertreiben. Laut [Auer 2015] kann sich eine Verwendung recycelter Materialien zur Produktion neuer $gSSM_{sc/mc}$ zudem positiv auf das Firmenimage auswirken. In toto existiert aus technologischer Sicht für rezyklierte Materialien aus dem Recycling zur Verwendung und aus dem Recycling zur Verwertung sowohl branchenintern als auch branchenextern ein weites Einsatzspektrum. Welche Absatzmärkte realiter in Frage kommen, ist jedoch in jedem Fall von mehreren Einflüssen abhängig und mindestens durch die beschriebene kombinierte technoökonomische Vorbetrachtung zu eruieren. Zudem ist tendenziell davon auszugehen, dass eine brancheninterne Wiederverwendung der einzelnen Outputfraktionen aus einem Recyclingverfahren in Summe höhere Gesamtverkaufserlöse generiert als eine branchenexterne Weiterverwendung weil den branchenspezifischen Anforderungen entsprechend. Bei einem Verwertungsverfahren ist indessen eher eine branchenexterne oder eine branchenübergreifende Rezyklierung zu erwarten, weil selbst bei einer Wiederverwertung ohnehin mindestens ein Aufbereitungsprozess zwischenzuschalten ist – eine reine Wiederverwertung erscheint sonach letztlich höchlich unrealistisch.

5.4.3 Kostenseite

Die Kostenseite der Formel 5-4 (Seite 514) enthält sämtliche, unter Beachtung der vordefinierten Einschränkungen, für das Recycling eines $gSSM_{alt}$ obligaten Kosten. Wenngleich diese Gesamtkosten initial in drei Rubriken segmentiert wurden, ergibt sich nolens volens jedoch die Notwendigkeit der Zuordnung der Rubrik sonstige Kosten zu den Verfahrenskosten. Die Betrachtung wird sonach auf zwei Rubriken reduziert, welche zugleich den subsekutiven Unterkapiteln entsprechen: die Verfahrenskosten sowie die Sammel- und Transportkosten. Jede Rubrik kann zudem mitunter auf oberster Betrachtungsebene in einen pagatorischen variablen und fixen Kostenbestandteil differenziert werden – je nach Struktur der spezifischen Datenbasis.

5.4.3.1 Verfahrenskosten

Wenngleich eine Unterteilung dieser Rubrik in variable und fixe Kostenbestandteile für eine gezielte Analyse sinnvoll erscheint, ist dies schlicht nicht möglich. Die Gründe dafür sind vielschichtig, letztlich jedoch im Gros auf die bislang nicht vorhandenen Erfahrungswerte mit einem hochwertigen Recycling von $gSSM_{alt}$ ob der Absenz einer betrieblichen respektive industriellen Praxis zurückzuführen. Dieserhalb wird sich ausschließlich auf Angaben in der einschlägigen Literatur bezogen, welche an gegebener Stelle entsprechend aufgeführt wird. In toto existieren, in Abhängigkeit der jeweiligen Quelle, zwei Arten von Angaben. Das sind zum einen Angaben bezüglich einer notwendigen Mindestkapazität, die ein potenzielles Recyclingwerk für einen profitablen Betrieb aufweisen sollte und zum anderen einzelne Schätzwerte von aggregierten Kosten, wobei meist die Begrifflichkeit der Prozesskosten Anwendung findet; es erfolgt ingleichen keine Aufschlüsselung in variable und fixe Kostenarten. Wesentlich gewichtiger ist zudem die Tatsache, dass in jedweder Quelle alle Kosten des laufenden Betriebs, die nicht direkt den Sammel- und Transportkosten zugerechnet werden können, mit in die Rubrik der Prozesskosten inkludiert werden; wiederum ohne die Möglichkeit einer Aufschlüsselung in einzelne Kostenblöcke. Um die in der Literatur gegebenen Werte im Sinne der vorliegenden Arbeit nutzen zu können, wird dieserhalb die beschriebene Handhabe übernommen. Wenngleich sich rein gedanklich einzelne Kostenfaktoren den beiden Rubriken der Verfahrenskosten und der sonstigen Kosten zuschreiben lassen, könnten diese Terme anschließend nicht entsprechend quantifiziert werden.

Es werden folglich alle nicht direkt den Sammel- und Transportkosten zurechenbaren pagatorischen Kosten des laufenden Betriebs einer spezifischen Recyclingaktivität für kristalline Siliziumsolaraltmodule in dieser Rubrik jeweils zu einem Wert aggregiert. Dies beinhaltet beispielshalber Kosten für Energie und Betriebsstoffe der einzelnen Apparaturen; für Chemikalien, Heizmedien und Gehälter der entsprechenden Arbeitskräfte in der „Produktion“; für Strom und Heizmedien zum Betreiben des Standortes; für Gehälter weiterer Mitarbeiter außerhalb der „Produktion“; für Mieten, Versicherungen und Zinsen; für die Instandhaltung sowie für Kosten, die mit der Entsorgung etwaiger Reststoffe (Deponierungskosten oder Weiterleitung der entfernten Modulanschlussdosen) einhergehen et cetera. Den initialen Einschränkungen folgend sind in diesen aggregierten Kostentermen neben den Sammel- und Transportkosten zur Beschaffung des Prozessinputs exemplarisch ebenfalls keine Abschreibungen, Auszahlungen für Überstunden und Opportunitätskosten enthalten.

Aus der Verwendung literaturbezogener Datenquellen ergibt sich allerdings ein Fehlerpotenzial, welches jedoch aufgrund nicht existenter Substitute als notwendiges Übel mit einkalkuliert werden muss. Neben der sehr geringen Quantität der zur Verfügung stehenden Datenquellen wurden zudem erhebliche Mängel einzelner Angaben identifiziert, welche im Anschluss an die Verwendung einer fehlerbehafteten Quelle im Einzelnen aufgeführt und diskutiert werden. Um die Zuordnung des Mangels zur zugehörigen Diskussion zu gewährleisten, wird sich einer Kennzeichnungslogik von hochgestellten Indizes der Form: [M1], [M2], [...], [Mn] an der Angabe der mangelhaften Datenquelle oder der kritisierten Angabe selbst bedient. Diese Zuordnung soll jedoch lediglich für dieses Unterkapitel Geltung besitzen.

Die Angaben etwaiger aggregierter Prozesskosten unterscheiden sich naturgemäß nicht nur von Quelle zu Quelle, sie besitzen auch verschiedene Bezugsgrößen und -einheiten. Als Resultat daraus müssen die Einzelwerte zum Zwecke der Vergleichbarkeit zumindest auf eine kongruente Einheitenbasis umgerechnet werden, was mitunter eine Näherungslösung und Anpassung der Bezugsgrößen effiziert. Nachstehende Tabelle 5-18 fasst alle verfügbaren Einzelwerte sowohl im Originalzustand mit Bezugsgröße und Einheit als auch in Form der angepassten Vergleichswerte, der genutzten Anpassungsfaktoren und zugehörigen Quellenangabe übersichtlich zusammen.

Tabelle 5-18: Zusammenfassung adäquat verfügbarer Einzelwerte von Kosten für das Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule inklusive Quelle, Umrechnung und Vergleichswerten.

Quelle	Aggregierte Verfahrenskosten inklusive Bezugsgröße	Originalangabe	Bezug	Anpassungs-faktoren	Berechneter Vergleichswert in [€/t]	Normierter Wert in [€/Jahr]
	Cucchiella *et al.* 2015	760[M1] €/t	185 t/Jahr		760	140.600
		326[M1] €/t	1480 t/Jahr		326	482.480
	Choi und Fthenakis 2014b[M2]	14.321 $/Monat[M3]	17 t bzw. 1876 Module		-	-
		16.215 $/Monat	185 t/Jahr	12 Monate/Jahr 185 t/Jahr 1,35 $/€	779,1	144.134
		87.658 $/Monat	20.000 t/Jahr	12 Monate/Jahr 20.000 t/Jahr 1,35 $/€	38,96	779.200
	Fthenakis 2000	0,13 $/$W_p$	150.000[M4] Zellen/Jahr		-	-
	McDonald und Pearce 2010[M5]	32,11 $/Modul	84,39 t/Jahr	20,25 kg/Modul 1,33 ($/€)	1.192	100.613
	Küffner, Georg 2010 [M6]	175 €/t			-	-
	Ulrich, Sven 2014[M6]	200 €/t			-	-
	Brellinger, Christoph 2014[M7]	170-250 €/t	5.000-20.000 t/Jahr		170-250	-
	Frisson *et al.* 2000[M8]	0,215 €/Wafer	576 Wafer/h		637	990.854

Bei der Umrechnung der Währungseinheiten für betreffende Werte wurde vereinfachend der durchschnittliche Wechselkurs nach [Deutsche Bundesbank 2015] im Zeitraum der Quellenveröffentlichung zugrunde gelegt; auf eine Inflationsbereinigung wurde verzichtet weil ein sehr geringer realer Differenzzeitraum. Weiter werden lediglich die Werte in den orange eingefärbten Zellen der Tabelle 5-18 für die weitere Betrachtung genutzt. Dies ergibt sich aus der nachstehenden Liste, die die in der Tabelle 5-18 identifizierten Mängel der aufgeführten Werte und Quellen diskutiert:

- [M1]: Die beiden in [Cucchiella *et al.* 2015] angegebenen Werte (760 €/t und 326 €/t) entbehren jeglicher Begründung. Es wird kein Indiz aufgeführt, woher diese Werte stammen, noch welcher Grundlage sie sich bedienen. Dieserhalb wird unterstellt, dass es sich um reine Schätzwerte der Autoren handelt.
- [M2]: [Choi und Fthenakis 2014b] legen in der Modellbeschreibung das Recyclingverfahren der SolarWorld AG nach Kapitel 5.3.2 zugrunde. Dabei wird sich auf ein Recycling zur Verwendung bezogen, da einerseits kein Zerkleinerungsprozess

in der Beschreibung enthalten ist und andererseits die Rückgewinnung von Zellen beschrieben wird. Dementgegen wird der den Kosten gegenzurechnende Profit aus dem Erlös der Outputfraktionen des Recyclingprozesses auf Basis des Marktpreises von Silizium berechnet. Auch die Auflistung der einzelnen Outputfraktionen ist widersprüchlich. Den Indizien folgend kann indessen davon ausgegangen werden, dass eine Vermischung der beiden Verfahrensvariationen erfolgte, wobei der kleinsten Kapazitätsangabe wohl ein Recycling zur Verwendung und den beiden anderen Angaben ein Recycling zur Verwertung zugrunde liegt. Dies kann letztlich aus dem Vergleich der aufgeführten monatlichen Profite mit den eigenen im Kapitel 5.4.2.1 ermittelten potenziellen Einzelerlösen geschlussfolgert werden. Weiter resultieren die einzelnen Kalkulationen aus der Zusammensetzung von kristallinen Siliziumsolarmodulen, welche vor dem Jahr 1983 produziert wurden. Den bisherigen Ausführungen der vorliegenden Arbeit folgend ist dies sowohl zur Berechnung von Kosten als auch zur Berechnung von Erlösen äußerst kritisch zu bewerten, da sich neben deren qualitativen besonders die quantitative Zusammensetzung enorm verändert hat. Dies zeitigt, wie ebenfalls schon mehrfach angeführt, einen enormen Einfluss auf die benötigte Anlagentechnik für das Recycling mit all seinen Konsequenzen.

- [M3]: Die angegebenen Kosten basieren lediglich auf dem Recycling der Chevetogne-Anlage; das Recycling einer einzelnen Anlage wird auf den laufenden Betrieb eines Recyclingwerkes projiziert.
- [M4]: Übernimmt den Bezugswert von 150.000 zu recycelnden kristallinen Siliziumsolarzellen je Jahr aus der Originalquelle [Bohland *et al.* 1998] nicht korrekt. Der tatsächliche Bezugswert beträgt 250.000 kristallinen Siliziumsolarzellen je Jahr.
- [M5]: Bezieht sich nicht auf die Originalquelle, sondern auf [Fthenakis 2000] und übernimmt falschen Bezug von 150.000 kristallinen Siliziumsolarzellen je Jahr (vergleich Mangelbeschreibung: [M4]). Zudem werden zur Kalkulation Erlöse und Kosten von verschiedenen Quellen einer Zeitspanne zwischen 1998 und 2010 ohne Korrektur zugrunde gelegt. Weiter wird der angegebene Wert der Recyclingkosten aus der Originalquelle [Bohland *et al.* 1998] von 0,13 $/W$_p$ direkt auf moderne Module mit einer Leistung von 247 W$_p$/Modul bezogen.

- [M6]: Diese beiden Datenquellen geben lediglich einen Schätzwert an. Zudem wird keine Bezugsbasis geboten. Es ist sonach nicht nachvollziehbar, welche Betriebsgröße diesen Kostensatz effiziert.
- [M7]: Die angegebenen Kosten und die zugehörige Bezugsgröße sind den Angaben des Autors nach reine Schätzwerte [Brellinger 2016]. Weiter wurde auf der anschließenden Diskussion zu [Brellinger 2014] die untere Schranke des Bezugswertes durch den Sprecher selbst für zu niedrig erklärt und auf eine Spanne von 10.000 bis 20.000 t/a korrigiert.
- [M8]: Die dargestellten Kosten beziehen sich auf einen vollkommen anderen technologischen Ansatz (vergleich hierfür Kapitel 5.3.8) wie der in diesem Kapitel fokussierte und generieren deshalb nicht vergleichbare Werte.

Die in der Tabelle 5-18 berechneten Vergleichswerte bilden den zugehörigen Quellen nach jeweils die für das Recycling eines kristallinen Siliziumsolaraltmoduls zugrunde liegenden Prozesskosten als Stückkosten ab, welche nur für die entsprechende Bezugsgröße Geltung besitzen. Die Bezugsgröße selbst ist als Kapazitätsangabe der jeweiligen Recyclingaktivität zu interpretieren, wobei sie auf der spezifischen Aktivitätsebene als Arbeitspunkt unter voller Auslastung verstanden wird [Cucchiella *et al.* 2015]; sie stellt eine aktivitätsspezifische obere Kapazitätsschranke dar.

Aufgrund der Vielzahl identifizierter Mängel, welche zudem mitunter auch ob der Implementierung fehlerbehafteter Querverweise eine Fehlerfortpflanzung begünstigen und im Extremfall falsche Schlussfolgerungen zeitigen können, resultiert lediglich eine sehr geringe Anzahl adäquater Datenpunkte. Anhand dieser „selektierten“ Wertepaare wurde eine Regressionsanalyse zur Ermittlung einer kontinuierlichen Näherungsfunktion durchgeführt. Das Resultat unterliegt jedoch mehreren Einschränkungen. Zum einen hängt die Genauigkeit, beziehungsweise die Deckungsgüte der ermittelten Funktionen stark von der Verteilung und Anzahl der Stützstellen ab, was sich im vorliegenden Fall mit vier Wertepaaren als äußerst prekär darstellt. Zum anderen gibt die ermittelte Funktion lediglich Näherungswerte aus, welche keinen Anspruch auf ein reales Verhalten haben; sie generieren aber in letzter Konsequenz einen guten Schätzwert für die undefinierten Zwischenräume der Stützstellen. Die genutzten Wertepaare setzen sich aus den in der Tabelle 5-18 orange hinterlegten Werten für den „normierten Wert“ als abhängige Variable und der Bezugsgröße als unabhängige Variable zusammen. Die Normierung der berechneten Vergleichswerte erfolgte über deren Multiplikation mit

dem zugehörigen Arbeitspunkt. Nachstehende Abbildung 5-25 zeigt die entsprechenden Ausgangspunkte und das Ergebnis der Regression für zwei verschiedene Ansätze. Auf die jeweilige mathematische Herleitung der beiden Näherungsfunktionen wird nicht weiter eingegangen weil nicht zielführend und falls notwendig selbst nachvollziehbar.

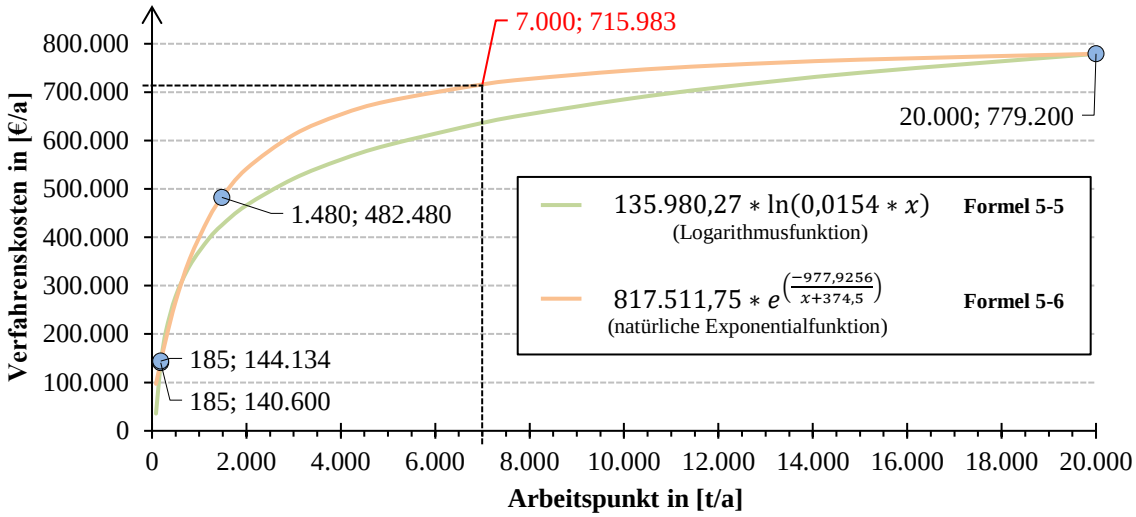


Abbildung 5-25: Darstellung der kalkulierten Wertepaare von aktivitätsspezifischen Verfahrenskosten in [€/a] und zugehörigem Arbeitspunkt in [t/a] sowie der beiden ermittelten Näherungsfunktionen.

Für interpolierbare und linksliegende extrapolierbare Werte soll die natürliche Exponentialfunktion Geltung besitzen, für rechtsliegende extrapolierte Werte die Logarithmusfunktion. Dies liegt in den mathematischen Gegebenheiten begründet. So zeigt die Logarithmusfunktion für kleine Werte im positiven Definitionsbereich negative Kosten auf, was deren Verwendung diesbezüglich ausschließt. Zudem zeigt die natürliche Exponentialfunktion für linksliegende unabhängige Variablen ein ansprechendes Verhalten. Wird beispielshalber das bereits ausgeschlossene Wertepaar von [McDonald und Pearce 2010] zum Vergleich herangezogen, ergäbe sich lediglich eine Differenz von 5,66 % zum Wert, der mittels der entsprechenden Funktion berechnet wird. Für rechtliegende extrapolierbare Werte verbietet das Grenzwertverhalten der natürlichen Exponentialfunktion deren Verwendung: für sehr hohe Werte der unabhängigen Variable nähert sich die Funktion asymptotisch ihrem ersten Funktionsterm an. Der Grenzwert würde folglich bei circa 817.511,75 €/a liegen. Im Gegensatz dazu zeigt die natürliche Logarithmusfunktion ein streng monoton wachsendes Verhalten im betrachteten Definitionsbereich, wobei der Anstieg mit steigenden Werten der unabhängigen Variable entlang der Abszisse einem ständigen Verlust unterliegt. Dies wird im Verhalten den Kostenreduktionspotenzialen infolge von Skaleneffekte gerecht, welche bei der Verwendung von Chemikalienbädern und Pyrolyseöfen mit steigender Auslastung gegeben sind [Choi und Fthenakis 2014b].

Auf Basis der ermittelten Funktionen kann, wenngleich auch nur näherungsweise, für beliebige Arbeitspunkte unter Vollauslastung respektive für die entsprechenden Kapazitätsobergrenzen der aktivitätsspezifische aggregierte Kostenblock der Verfahrenskosten geschätzt werden. In der Abbildung 5-25 ist dies exemplarisch für eine Recyclingaktivität mit einer Kapazität von 7.000 t $gSSM_{alt}$ je Jahr dargestellt. Der zugehörige Wert ergibt sich aus dem Einsetzen der unabhängigen Variable in die entsprechende, dem Definitionsbereich zugeteilte Funktion. Im vorliegenden Beispiel müsste sonach der Wert von 7.000 t/a für *x* in die natürliche Exponentialfunktion eingesetzt werden und resultiert in geschätzten jährlichen Verfahrenskosten von rund 716.000 €.

Werden beide Funktionen durch die Bezugsgröße dividiert, ergeben sich daraus die zugehörigen Stückkostenfunktionen. Allerdings gelten diese wiederum nur unter der Bedingung, dass der Arbeitspunkt der Vollauslastung der aktivitätsspezifisch verfügbaren Kapazität entspricht. Angelehnt an die Darstellung der vorangegangenen Abbildung zeigt Abbildung 5-26 beide sich aus der Division ergebenden Funktionen, die vier ursprünglichen Vergleichswerte und den exemplarischen Arbeitspunkt von 7.000 t/Jahr.

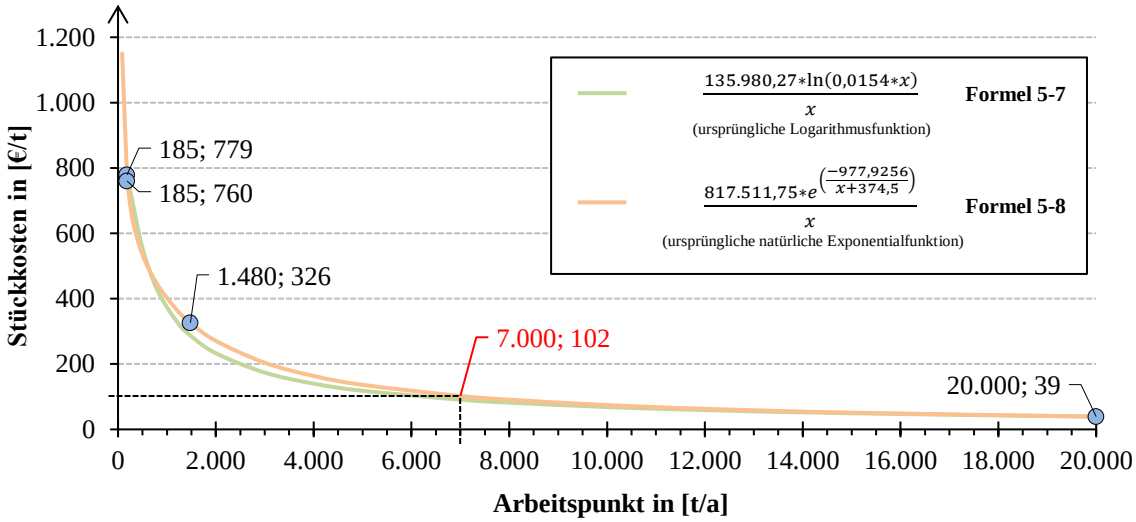


Abbildung 5-26: Darstellung der kalkulierten Wertepaare von aktivitätsspezifischen Verfahrenskosten als Stückkosten in [€/t] und dem zugehörigen Arbeitspunkt in [t/a] sowie der beiden angepassten Näherungsfunktionen.

Wenngleich die Differenz beider Kurven im dargestellten Abszissenabschnitt gering ausfällt, soll die Zuordnung der jeweiligen Funktion zu etwaigen linksliegenden extrapolierbaren Werten, den interpolierbaren Werten und den rechtliegenden Pendants der zuvor getroffenen Logik entsprechen. Sonach ergibt sich für das bereits verwendete Beispiel mit dem exemplarischen Arbeitspunkt unter Vollauslastung bei 7.000 t/a, dass verfahrensbezogene Stückkosten im Bereich von 102 €/t angesichts der getroffenen Annahmen für die zur Debatte stehende Auslegung als möglich erscheinen. Wie bereits

für die ermittelten Funktionen zur Beschreibung der gesamten Verfahrenskosten begründet, sind die Funktionen zur Ermittlung der Verfahrenskosten als Stückkosten ebenfalls nur für die jeweils zugrunde liegende Bezugsgröße geltend; es handelt sich um aktivitätsspezifische Werte, die keine interne Skalierung erlauben.

Neben den Angaben in der Literatur in Form aggregierter Wertepaare von „Prozesskosten“ und zugehörigen Bezugsgrößen existiert erwähntermaßen auch eine weitere verwertbare Größe: Schätzungen bezüglich einer notwendigen Mindestkapazität, die ein potenzielles Recyclingwerk für einen profitablen Betrieb aufweisen sollte. Diese Angaben sind ähnlich den bereits diskutierten Wertepaaren einigen Unsicherheiten, subjektiven Neigungen und zu beachtenden Mängeln unterlegen, weshalb sich auch für die nachstehenden Angaben hinfort der bereits eingeführten Kennzeichnungslogik bedient wird.

Die in nachstehender Abbildung 5-27 aufgeführten Schätzwerte stellen Originalangaben aus der zugeordneten Quelle dar. Es sind keine zusätzlichen Umrechnungen, Anpassungen oder Normierungen, wie jene in der Tabelle 5-18 aufgeführten, notwendig.

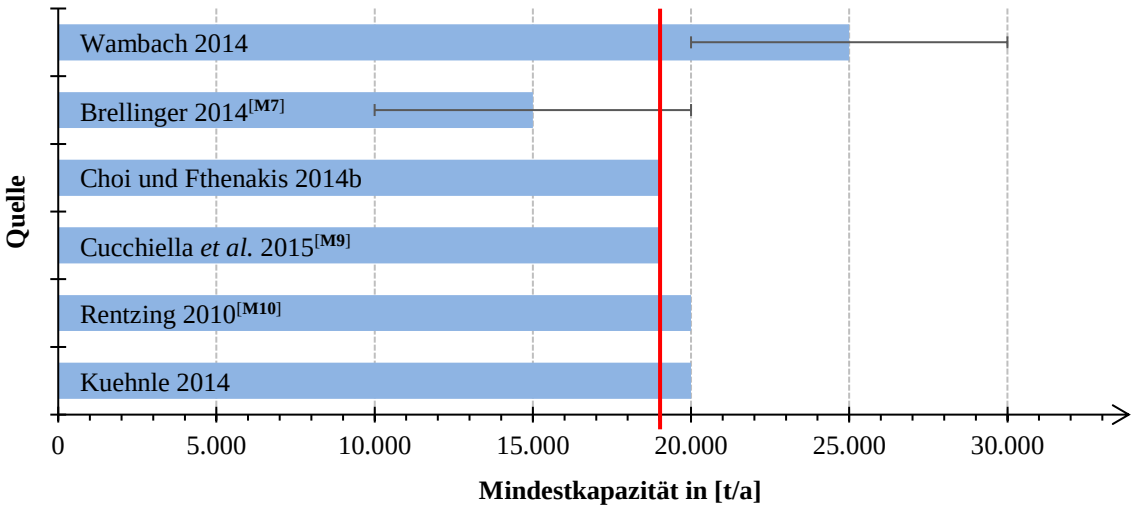


Abbildung 5-27: In den aufgeführten Quellen angegebene Schätzungen zu Mindestkapazitäten für einen rentablen Betrieb eines Recyclingverfahrens für kristalline Siliziumsolaraltmodule.

Die in der Abbildung dargestellten Bereichskennungen für die Werte aus [Wambach 2014] und [Brellinger 2014] sollen den in beiden Quellen aufgeführten Bereichsangaben gerecht werden. Laut [Wambach 2014] wäre eine Recyclingkapazität von 20.000 bis 30.000 t/a für einen rentablen Betrieb einer Recyclinganlage notwendig, laut [Brellinger 2014] entsprechend 10.000 bis 20.000 t/a. Generell ist diesbezüglich jedoch nochmals zu betonen, dass jedwede Angabe lediglich auf Schätzwerten basiert und

die einzelnen Rahmenbedingungen wenn überhaupt nur unzureichend dargestellt sind. Zudem wurden folgende weitere Mängel identifiziert:

- [M9]: [Cucchiella *et al.* 2015] listet für einige Kapazitäten etwaige monatliche Gewinne auf und führt auch entsprechend die zugehörigen Quellen an. Allerdings wurden Werte aus den Originalquellen falsch entnommen und ziehen Fehlinterpretationen nach sich. Zu nennen ist an dieser Stelle die Zuordnung eines monatlichen Verlustes von 7.509 $/Monat zu einer Recyclingkapazität von 1.876 Tonnen. Diese Angabe wurde [Choi und Fthenakis 2014b] entnommen, wobei in der entsprechenden Originalquelle jener monatliche Verlust einer Recyclingkapazität von 17 Tonnen (1.876 Modulen) entspringt.
- [M10]: Die Angabe von 20.000 t/a wird in Verbindung mit zwei weiteren Angaben aufgeführt, welche letztlich eine Umrechnung auf andere Bezugseinheiten darstellen sollen. Allerdings erweist sich mindestens eine der drei Angaben als fehlerhaft, wobei unklar ist, welche der drei den gesicherten Wert darstellt.

Die in der Abbildung 5-27 aufgeführten Werte decken auf den ersten Blick einen gemeinsamen Raum ab, welcher sich mit durchschnittlich 19.000 t/a beschreiben lässt (durch rote Linie gekennzeichnet). Obschon dieser Wert, wie bereits mehrfach ausgeführt, großen Unsicherheiten unterliegt (mitunter auch spekulativen Charakter aufweist), soll er für die spätere Diskussion eine erste Orientierungshilfe respektive ein Indiz für den Bereich darstellen, in der der benötigte konstante annuelle Mengenstrom kristalliner Siliziumsolaraltmodule des Break-even vermutet werden könnte.

An dieser Stelle sei darüber hinaus noch auf einen bisher in der Fachliteratur nicht beachteten Aspekt zur potenziellen Senkung der Verfahrenskosten als Rubrik hingewiesen, welche bei einem möglicherweise angestrebten Recycling zur Wiederverwendung letztlich eine Win-win-Situation zwischen Recycler und Produzenten generieren kann. Wie im Kapitel 5.3.9 in der Diskussion der Tabelle 5-12 auf den Seiten 494f festgehalten, ist der energetische Aufwand des in dieser Arbeit für ein Recycling zur Wiederverwendung zugrunde liegenden Verfahrens im Gros auf den Pyrolysevorgang und den Betrieb der zugehörigen Sekundärmaßnahme zurückzuführen und beträgt grob 92 kWh je $gSSM_{alt}$. Die Senkung des Stromverbrauchs geht sonach mit einem hohen Kosteneinsparpotenzial in der Rubrik der Verfahrenskosten einher; dies gilt analog für die Senkung der Stromkosten je kWh. Kann der Recycler folglich die Stromkosten zum Verfahrensbetrieb senken, ergäbe sich bei einer Grenzwertbetrachtung

das Potenzial, diese Einsparungen an die entsprechenden Endkunden weiterzugeben. Im Falle des Recyclings zur Wiederverwendung kann sich bei einer langfristigen Vertragssituation sonach eine Ausstattung der Recyclers mit Solarmodulen durch den Abnehmer der generierten Outputfraktionen eine beidseitige Kostenreduktion einstellen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass, bei der derzeitigen Lage der Verfügbarkeit adäquater und stichhaltiger Informationen, die Rubrik der Verfahrenskosten einen großen Unsicherheitsfaktor bei der Suche eines möglichen Break-even darstellt. Neben den in diesem Kapitel generierten Werkzeugen kann die Rubrik der Verfahrenskosten gleichwohl als unbekannte Variable in die weitere Diskussion einfließen – je nach Betrachtungswinkel und unter Beachtung der Risiken, die sich mit der Verwendung jener in der Konsequenz als nicht gesichert darstellenden Werte ergeben.

5.4.3.2 Sammel- und Transportkosten

Im Gegensatz zur vorangegangenen Betrachtung der Verfahrenskosten ist es im Falle der Sammel- und Transportkosten nicht möglich eine allgemeine Aussage oder einen universellen Lösungsansatz herzuleiten – es handelt sich in Gänze um Einzelfalllösungen spezifischer Problemstellungen. Allenfalls können für grob pauschalisierte Fragestellungen Lösungsstrategien und -ansätze erarbeitet werden, welche jedoch in der Konsequenz letztlich nie eine Aussage für eine problemspezifische Einzellösung zeitigen dürfen. Dieserhalb ist eine ausführliche Vorbetrachtung zu den jeweiligen Rahmenbedingungen sowie eine Definition der Annahmen und Einschränkungen zur präzisen Abgrenzung je Einzelfall notwendig. In toto stellen sich jedoch die möglichen Variationen als mannigfaltig heraus. Eine umfassende Einzelfallbetrachtung sämtlicher Eventualitäten ist folglich nicht zielführend, weshalb der in diesem Kapitel zu betrachtende Rahmen zuvörderst eingegrenzt werden muss.

Primär gilt es zwischen den beiden definierten Planungshorizonten zu unterscheiden, da diese völlig unterschiedliche Prämissen supponieren. Gleichwohl ist es zwingend notwendig, den potenziellen Betrachtungsrahmen an die bisher gewonnenen Erkenntnisse zu koppeln. Infolge der grundlegenden Fokussierung dieser Arbeit auf das Recycling von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen als Betrachtungsgegenstand und der regionalen Einschränkung begründet sich dies besonders darin, dass die Verfügbarkeit obligater Datengrundlagen zur Diskussion solch spezieller Problematiken als schlicht inexistent

anzusehen ist. Es können sonach nur Fragestellungen diskutiert werden, für die entweder zuverlässige Basisdatensätze existieren oder die auf zuvor in dieser Arbeit eigens ermittelte Daten zugreifen. Darauf aufbauend ergibt sich mitunter wiederum die Möglichkeit pauschalisierte Schlussfolgerungen abzuleiten.

Die Rubrik der Sammel- und Transportkosten soll die Kosten eines oder mehrerer Betreiber potenzieller Recyclinganlagen diskutieren, welche der Beschaffung, der Sammlung und dem Transport von $gSSM_{alt}$ sowie dem zugehörigen logistischen Einsatz zuzuschreiben sind – gleichwohl ob als Eigen- oder Fremdleistung. Grundlegend sind im Falle der Eigenleistung dafür Daten bezüglich pagatorischer fixer und variabler Kosten notwendig, wobei sich der fixe Kostenblock diesbezüglich teilweise als sprungfix darstellt. Sprungfix deshalb, weil die fixen Kostenbestandteile von der benötigten Fuhrparkgröße abhängen. Diese begreifen beispielshalber KFZ-Versicherungen, -Steuern, Fahrerpersonalkosten samt Lohnnebenkosten et cetera ein. Der variable Kostenblock umfasst dahingegen Kosten, die von fahrzeugspezifischen Kenndaten wie Nutzlast und Kraftstoffverbrauch als auch von Leistungsdaten wie gefahrene Kilometer je Jahr respektive der Verkehrsleistung in Tonnenkilometer abhängen. Hierzu zählen beispielshalber Kraftstoffkosten, Reifenkosten, Schmierstoffkosten sowie Kosten zur Reparatur und Pflege des Fuhrparks. Diese lassen sich jedoch nur, wie bereits angedeutet, für spezifische Rahmenbedingungen ausmachen. Bei einer Auslagerung der Beschaffungslogistik stellen sich die Kosten dieser Rubrik hingegen wiederum als aggregierte Größe dar, welche je nach Vertragsform einen fixen oder einen variablen Block bilden. Gleichwohl ist auch im Falle der Fremdleistung der potenziell zu ermittelnde Betrag dieser Kostenrubrik nur für speziell definierte Rahmenbedingungen gültig.

Sonach kommt besonders den Erkenntnissen des Kapitels 5.2.2: „Prognose der jährlichen Altmodulströme“ ein essenzieller Charakter zur restriktiven Eingrenzung des Betrachtungsgegenstandes zu. Neben der im benannten Kapitel übergeordneten Unterteilung des Planungshorizontes und den damit verbundenen jeweiligen Anforderungen an die Betrachtung der potenziellen Kosten einer Beschaffungslogistik sind in besonderem Maße die erzeugten Daten etwaiger regional zur Verfügung stehender Mengen kristalliner Siliziumsolaraltmodule als desiderate Datenbasis von herausragender Relevanz.

Auf oberster Ebene wird für die nachfolgende Diskussion sowohl aufgrund der diffusen Verstreuung installierter Anlagen (auf regionaler wie nationaler Ebene) und einer sich daraus ableitenden Komplexität der zugehörigen Optimierungsprobleme bezüglich relevanter Entscheidungen zur Ermittlung potenzieller Beschaffungskosten im Einzelfall als auch im Zuge der Befunde der Abfallprognose, woraus hervorgeht, dass derzeit insbesondere mit einem konstanten Altmodulstrom aus Produktionsausschüssen zu rechnen ist, vorerst die kurz- und mittelfristige Planungsphase fokussiert. Dies bringt mehrere Vorteile mit sich. Zum einen steht mit dem als konstant angenommenen Produktionsausschuss eine räumlich wie zeitlich stabil verfügbare Altmodulmenge zur Verfügung. Aus der räumlichen und zeitlichen Konstanz ergibt sich die Möglichkeit zur Generierung eines statischen Optimierungsproblems, welches ob der Komplexitätsreduktion in der Konsequenz eine verständliche und zielführende Diskussion begünstigt. Zum anderen machen nach Kapitel 5.2.2 derzeit Produktionsausschüsse den Großteil des konstant verfügbaren Abfallstromes aus. Weiter ist vor Eintreten des Massenstromes ab circa 2028 die Schwankung der Altmodulströme aus dem tatsächlichen Gebrauch prozentual (bezogen auf den jährlich regional prognostizierten Stoffstrom) zu groß für eine gesicherte Analyse. Zudem stellt sich deren absoluter Beitrag bis zur langfristigen Planungsphase besonders in der regionalen Betrachtung, wie beispielshalber in den Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters, mit weniger als 30 % als vergleichsweise gering dar. Dahingegen kann dieser Anteil am gesamten Stoffstrom gleichwohl in welcher Höhe nur positive Beiträge zu den Ergebnissen liefern und so stets unterstützenden Charakter aufweisen; die regional vorhandenen Potenziale können bei einer Umsetzung der Ergebnisse zusätzlich abgeschöpft werden und so als eine ergänzende Stütze oder eine notwendige Sicherheit für den wirtschaftlichen Betrieb auftreten. Mit dieser übergeordneten Einschränkung auf die kurz- und mittelfristige Planungsphase und damit auf den Altmodulstrom aus Produktionsausschüssen ist zudem eine räumliche Restriktion verbunden. Der bisherigen Logik und den Erörterungen zu den regionalen Verteilungen der Standorte der Modulproduzenten folgend, ergibt sich aus der Fokussierung auf die Produktionsausschüsse eine Reduktion des potenziellen Einzugsgebietes für die Beschaffungslogistik auf das ostdeutsche PV-Produktionscluster. Als Konsequenz daraus handelt es sich sonach bei der Beschaffungsstrategie grundlegend um ein „multiple local sourcing“ zur Erreichung von Synchronisationseffekten (die daraus generierbare Senkung der Anbietermacht soll sekundären Charakter haben). Weiter tritt sie als regionales Netzwerk in Erscheinung, welches durch einen langfristigen und

polyzentrischen Verbund zur Erzielung von Wettbewerbsvorteilen aus der räumlichen Agglomeration gekennzeichnet ist. Diese zeitlichen und räumlichen Restriktionen der Betrachtungsebene und die bisherigen Erkenntnisse zu den Verfahrenskosten lassen den Schluss zu, dass sich für dieses Szenario die Betrachtung hinsichtlich eines entscheidenden Parameters auf einen eindimensionalen Ansatz reduziert: die Suche nach dem optimalen Standort eines potenziellen Recyclers für $gSSM_{alt}$ in den regionalen Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters und die sich daraus ableitenden minimalen Kosten der Beschaffungslogistik.

Dabei spielt die Annahme der Reduktion der zu betrachtenden Anlagenanzahl auf eine Betriebsstätte die zentrale Rolle. Diese Annahme erhält aus der Verknüpfung der Erkenntnisse aus dem Kapitel zu den Verfahrenskosten und den für dieses Szenario zur Verfügung stehenden annuellen Altmodulmenge Substanz. So attestieren die verschiedenen Quellen der Abbildung 5-27 auf Seite 533 einer Recyclingaktivität, unter unbestimmten sonstigen Rahmenbedingungen, ab einem Arbeitspunkt um circa 19.000 Tonnen Altmodule je Jahr einem rentablen Betrieb. Werden alle Produktionsausschüsse der zugrunde liegenden Region auf das Massenäquivalent umgerechnet[160], ergäbe sich eine verfügbare Menge von 1.062,26 Tonnen je Jahr. Selbst bei der Nutzung aller denkbaren Altmodulquellen im regionalen Rahmen würde sich bis zum Eintreten der Massenströme in der Langzeitplanungsphase im absoluten Maximum ein annueller Altmodulstrom von 3.820 t/a ergeben; im Durchschnitt der Jahre 2015 bis 2027 sogar nur rund 1.520 t/a. Dieser Durchschnittswert stellt letztlich weniger als 10 % der von den verschiedenen Quellen geschätzten Mindestmenge dar. Eine differenzierte Betrachtung in Abhängigkeit der Anlagenanzahl scheint für die getroffenen Einschränkungen sonach als nicht zielführend oder schlicht nicht notwendig. Gleichwohl kommt sonach der Auslegung der Recyclingkapazität beziehungsweise der Fixierung des Arbeitspunktes der Anlage im Rahmen der vorerst geschätzten Mindestmenge, welche die Grenze der Rentabilität darstellt, ebenfalls keine gewichtige Rolle zu; die Diskussion der Beschaffungskosten in den regionalen und zeitlichen Grenzen ist demnach unabhängig von der gewählten Kapazität der Recyclinganlage. Sonach sind etwaige Lagerrestriktionen et cetera für die Betrachtung der Rubrik der Sammel- und Transportkosten im definierten Szenario ingleichen zu vernachlässigen.

[160] Die Umrechnung erfolgt über den im Kapitel 4.5.6.1: „Stoffliche Zusammensetzung des definierten Standardsolarmoduls“ in der Tabelle 4-28 auf Seite 290 ermittelten Faktor von 84,39 g/W_p.

Der Bestimmung der für die definierte Problematik minimalen Kosten infolge der Verkehrsleitung ist ein Optimierungsproblem zu präponieren, da diese direkt von der Standortwahl abhängen; sie nehmen nur im optimalen Fall einen Minimalwert an. Essenzieller Bestandteil der Standortoptimierung ist eine gewichtete Kürzeste-Wege-Matrix. Diese setzt eine finite Liste zuvor definierter potenzieller Standorte *r* der Recyclingaktivitäten voraus. Aufgrund der Logik einer Standortoptimierung auf Basis gewichteter Kanten bieten sich in erster Linie die Standorte *q* der Bezugsquellen (PV-Produzenten) selbst an. Grund ist die jeweils eingesparte Verkehrsleistung zwischen Standort *r* der Recyclinganlage und *q* der Bezugsquelle, welche durch das Gewicht der Kante *(q;r)* beschrieben wird. Folglich stellt vordergründig jeder Standort *q* eines PV-Herstellers im Cluster einen potenziellen Standort *r* der Recyclinganlange dar. Alle Bezugsquellen *q* behalten ihre Gültigkeit, selbst wenn *q* gleich *r* gilt (der Standort der potenziellen Recyclinganlage entspricht zeitgleich dem Standort einer Bezugsquelle). In toto handelt es sich demnach um ein sogenanntes Center Problem zur optimalen Versorgung einer Höchstzahl einzurichtender Servicezentren, welche im vorliegenden Fall eins beträgt. Alle Standorte *q* und *r* sind im Sinne der Netzwerktheorie als Knoten anzusehen. Neben der Gewichtung der Netzwerkkanten ist zudem davon auszugehen, dass es sich um ein ungerichtetes Netzwerk handelt und zwischen allen Knoten ein Weg existiert. Zudem stellt sich die grundlegende Entfernungsmatrix als quasisymmetrisch dar weil auf Distanzdaten für den Straßengüterfernverkehr[161] (Autobahnen) beruhend.

Wenngleich alle Standorte *q* der PV-Produzenten einen potenziellen Standort der Recyclinganlage abbilden, können reale Recyclingstandorte *r* auch von der Knotenmenge *q* beliebig abweichen. Infolgedessen ergäbe sich eine offene oder eminent große Anzahl möglicher Knoten *r*. Deshalb wurde auf Basis der regionalen Gegebenheiten des ostdeutschen PV-Produktionsclusters, was neben den Produzentenstandorten *q* auch das reale Straßennetz einbegreift, eine Vorauswahl sinnvoller weiterer Knoten *r* für *r* ungleich *q* getroffen. Neben einer guten Anbindung an das örtliche Fernverkehrsnetz wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass die Summe aller potenziellen Knoten *r* die zu betrachtende Gesamtregion möglichst gut abdeckt, dass keine örtlichen Benachteiligungen entstehen und dass die Gesamtheit der ausgewählten Knoten *r* einer guten räumlichen Verteilung gerecht wird. Zusätzliche Knoten an den Grenzgebieten der

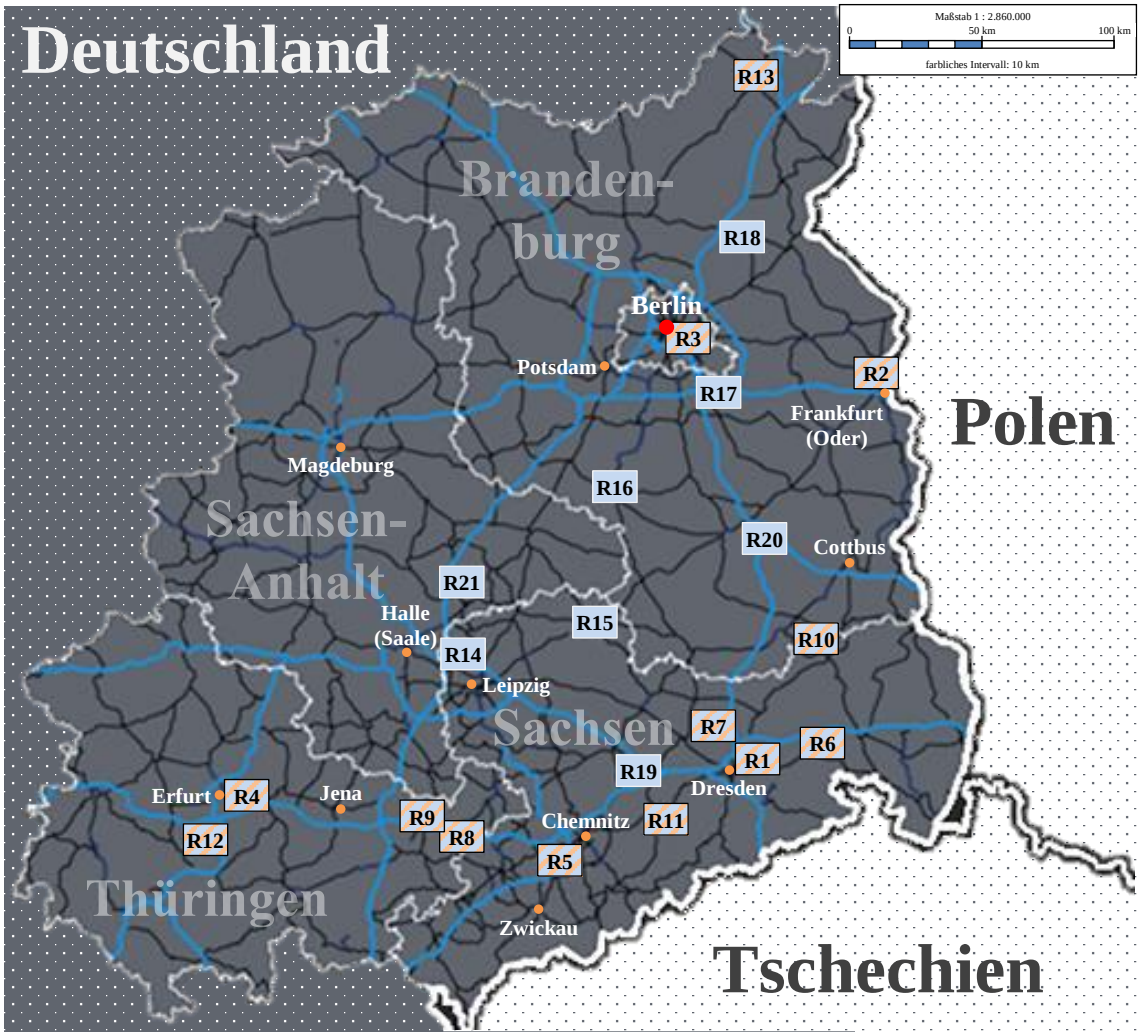
[161] Für Betrachtungen im Nahverkehr ergibt sich eine kompliziertere Situation, da aufgrund von beispielshalber Einbahnstraßen per Definition kein symmetrisches Entfernungsnetz vorliegen kann.

fokussierten Gesamtregion wurden zudem von vorn herein ausgeschlossen, da diese sowohl aus netzwerktheoretischer Sicht per Definition keine minimale Gesamtverkehrsleistung zeitigen können als auch zumeist bereits durch Knoten der Knotenmenge *q* repräsentiert werden (PV-Produzentenstandorte spannen das betrachtungsrelevante Gebiet auf). Neben den Produzentenstandorten *q* wird die initiale Entfernungsmatrix sonach um die potenziellen Recyclingstandorte Radefeld, Torgau, Jüterbog, Königs Wusterhausen, Eberswalde, Nossen, Lübbenau/Spreewald und Thalheim (Bitterfeld /Wolfen) ergänzt. Tabelle 5-19 fasst abschließend die Gesamtheit aller potenziellen Knoten *r* zusammen und ordnet ihnen den jeweiligen realen Standort und eine homogene Kennzeichnungsform zur Vereinfachung der weiteren Diskussion zu.

Tabelle 5-19: Übersicht der potenziellen Standorte für die Standortoptimierung inklusive Kennzeichnung und Zuordnung zur Tabelle 4-33 sowie Angabe der Zugehörigkeit zur jeweiligen Knotenmenge.

		Standort	**Kennzeichnung und Zuordnung der Modulproduzenten nach Tabelle 4-33**		**Sonstige Bemerkungen / Produktionsausschuss in [t/a]**	**Knoten-menge**
Kennzeichnung potenzieller Recyclingstandort	**R1**	Dresden	M1	SOLARWATT	67,51	q,r
	R2	Frankfurt (Oder)	M2	Astronergy	84,39	q,r
	R3	Berlin	M3	SOLON	16,88	q,r
	R4	Erfurt	M4	asola Technologies	29,54	q,r
	R5	Chemnitz	M5	Heckert Solar	75,95	q,r
	R6	Königswartha	M6	Solar Direct Group	9,49	q,r
	R7	Prösen	M7	ALGATEC Solar AG	50,63	q,r
	R8	Löbichau	M8	Sunset Solar	15,19	q,r
	R9	Korbußen	M9	GSS	8,44	q,r
	R10	Laubusch	M10	No-vo GmbH	3,80	q,r
	R11	Freiberg	M11	SolarWorld	421,95	q,r
	R12	Arnstadt	M12	SolarWorld	151,90	q,r
	R13	Prenzlau	M13	SCP Solar	126,59	q,r
	R14	Radefeld	-		-	r
	R15	Torgau	-		Keine direkte Autobahnanbindung	r
	R16	Jüterbog	-		Keine direkte Autobahnanbindung	r
	R17	Königs Wusterhausen	-		-	r
	R18	Eberswalde	-		-	r
	R19	Nossen	-		-	r
	R20	Lübbenau/Spreewald	-		-	r
	R21	Thalheim	-		-	r

Nachstehende Abbildung 5-28 verortet die einzelnen potenziellen Recyclingstandorte R1 bis R21 der finiten Knotenmenge *r* nochmals in einer kartografischen Darstellung. Dies soll einen ersten Eindruck der im System enthaltenen Entfernungen liefern und zudem die Einhaltung der vorweg angeführten Kriterien zur Auswahl der Standorte R14 bis R21 aufzeigen. Zur Orientierung wurden Städte im betrachtungsrelevanten Gebiet mit mehr als 100.000 Einwohnern als zusätzliche Informationsebene mit eingefügt. Gleiches gilt ferner auch für das aus Autobahnen und Bundesstraßen bestehende Fernstraßennetz.



Legende:

R19	potenzieller Recyclingstandort
R8	potenzieller Recyclingstandort, der zugleich Standort eines PV-Modulproduzenten ist
●	Stadt mit > 100.000 EW
●	Hauptstadt und Stadtstaat
—	Autobahn
—	Bundesstraße
—	Bundeslandgrenze

Abbildung 5-28: Kartographische Darstellung der betrachtungsrelevanten Region des ostdeutschen PV-Produktionsclusters samt Autobahn- und Bundesstraßennetz und Lokalisierung der potenziellen Recyclingstandorte der Knotenmenge r.

Anhand der Lokalisierung der Knoten R1 bis R21 können Wege bestimmter Eigenschaft zwischen jedem Knotenpaar ermittelt werden. Zur Bestimmung kürzester Wege bieten sich einschlägige Routenplanungswerkzeuge wie beispielshalber die Software „Bing Karten“ von Microsoft oder „Google Maps/Google Earth“ an, welche zumeist online zur freien Verfügung stehen. Die Generierung der einzelnen Werte und dementsprechend die Auswahl der an das Fernstraßennetz gebundenen Verbindungen erfolgt anhand mehrerer Kriterien. Zentraler Punkt ist die vordergründige Nutzung des verfügbaren Autobahnnetzes zum Stand Dezember 2016. Selbst wenn dies nicht immer die kürzeste Verbindung zwischen zwei Knoten generiert, soll die Nutzung des Autobahnnetzes Vorrang haben. Dies zeitigt für den straßengebundenen Fernverkehr zumeist die schnellste und vom Fahrverhalten her günstigste Verbindung. Besitzt ein Knoten keine direkte Autobahnanbindung, wird als Teilstrecke der kürzeste Weg hin zur Autobahn zugrunde gelegt. Dabei werden ob der Nutzung von Lastkraftwagen ausschließlich Bundesstraßen beachtet. Das Ergebnis ist eine Matrix der Form (q x r), wobei es sich im Falle des (q x q)-Teilbereiches um eine symmetrische Matrix mit einer Hauptdiagonalen, die ausschließlich den Wert 0 ausgibt, handelt. Dies ist der bisherigen Diskussion folgend auch zwingend notwendig, da für die Hauptdiagonale $q = r$ gilt. Die so ermittelte (q x r)-Matrix stellt demnach vielmehr eine beste-Wege-Matrix als eine (quasi)-kürzeste-Wege-Matrix dar - jedoch mit vergleichbarem Ziel.

Tabelle 5-20: Entfernungsmatrix aller Knoten der beiden Knotenmengen q und r in km.

Angaben in km		Knotenmenge r																			
		R1	**R2**	**R3**	**R4**	**R5**	**R6**	**R7**	**R8**	**R9**	**R10**	**R11**	**R12**	**R13**	**R14**	**R15**	**R16**	**R17**	**R18**	**R19**	**R20**	**R21**
Knotenmenge q	**M1**	0	178	178	216	86,2	35,4	21,7	127	136	77,3	58,2	231	305	124	102	151	155	249	42,3	97,8	159
	M2	178	0	89,5	359	257	209	172	330	326	126	229	373	189	234	149	132	65,1	133	213	78,1	211
	M3	178	89,5	0	302	256	208	172	273	269	147	228	327	118	178	149	85,8	29,1	61,6	212	87,6	165
	M4	216	359	302	0	144	249	231	90,4	86,6	284	181	25,2	438	140	195	252	299	382	180	308	159
	M5	86,2	257	256	144	0	119	101	55,7	63,9	148	43,1	159	384	109	138	230	235	328	50,4	177	183
	M6	35,4	209	208	249	119	0	50,5	160	168	72,6	90,3	263	333	156	139	179	184	277	76,1	127	193
	M7	21,7	172	172	231	101	50,5	0	142	151	72,5	73,2	246	300	139	78	146	151	244	57,3	93	174
	M8	127	330	273	90,4	55,7	160	142	0	9,6	196	100	105	407	109	165	222	268	351	92,3	219	128
	M9	136	326	269	86,6	63,9	168	151	9,6	0	203	115	101	403	105	160	217	264	347	99,4	226	124
	M10	77,3	126	147	284	148	72,6	72,5	196	203	0	129	301	273	186	99,3	132	124	217	113	68,5	220
	M11	58,2	229	228	181	43,1	90,3	73,2	100	115	129	0	210	355	115	134	201	206	299	21,7	149	150
	M12	231	373	327	25,2	159	263	246	105	101	301	210	0	452	154	209	266	312	396	194	321	173
	M13	305	189	118	438	384	333	300	407	403	273	355	452	0	315	275	212	145	74,2	339	214	292

Werden der Standortfindung allein die reinen Distanzdaten zugrunde gelegt, generieren die Standorte R16 gefolgt von R15 die besten Ergebnisse. Grund ist, dass beide potenziellen Standorte relativ zentral in der betrachtungsrelevanten Region liegen; sie besitzen die minimalen längsten Entfernungen, oder anders ausgedrückt: Zu allen anderen Knoten ist für R16 der längste unter den kürzesten Wegen minimal und beträgt für die Kante (M12;R16) 266 km. Die Standortentscheidung anhand der reinen Transportentfernungen zu treffen ist allerdings nicht sinnvoll, da dies weder die benötigte Transportleistung noch die tatsächlich zurückzulegende Strecke (zum Abtransport des gesamten annuellen Produktionsausschusses einzelner Quellen sind mitunter mehrere Fahrten notwendig) berücksichtigt. Dieserhalb werden die Kanten noch zusätzlich mit der zu transportierenden Menge gewichtet. Das Ergebnis ist eine Matrix, die die benötigte Transportleistung zwischen zwei Knoten in Tonnenkilometern wiedergibt. Hierfür sind alle Werte der einzelnen Zeilen mit dem jeweiligen zugehörigen annuellen Produktionsausschuss nach Tabelle 5-19 zu multiplizieren. Werden anschließend die spaltenspezifischen Summen gebildet, lässt sich die benötigte Transportleistung ausgehend von jedem Knoten einzeln ermitteln. Diese Summen geben für jeden potenziellen Standort der Knotenmenge *r* die gesamte benötigte knotenspezifische Transportleistung zur Sammlung aller im betrachteten System enthaltenen annuellen Produktionsausschüsse in Tonnenkilometern an. Der Knoten, der letztlich die geringste Summe besitzt, definiert sonach den optimalen Standort für eine potenzielle Recyclingaktivität. Nachstehende Abbildung 5-29 stellt alle knotenspezifisch benötigten Gesamttransportleistungen gegenüber. Die zugehörigen Einzelwerte finden sich im Anhang 5-5.

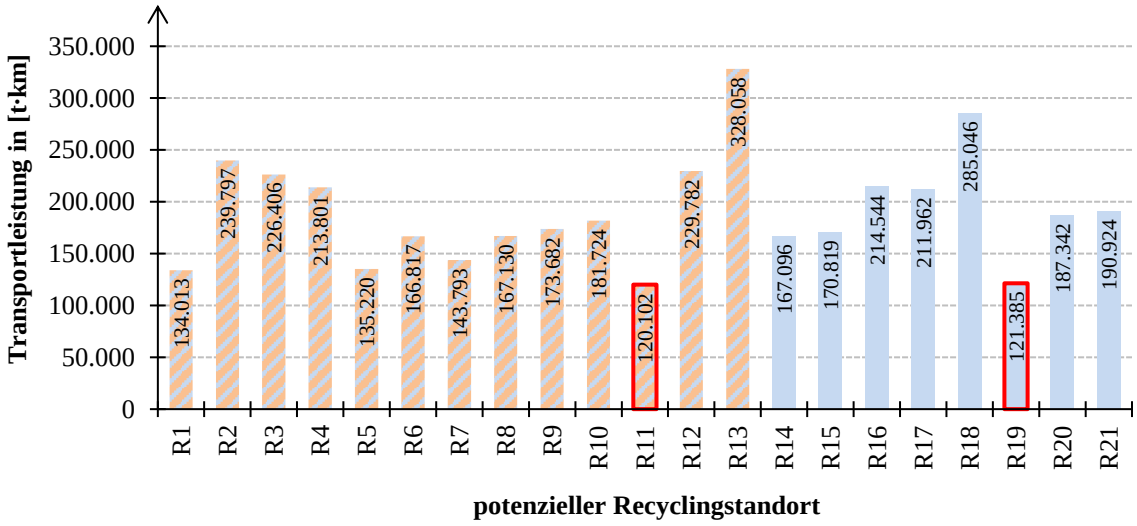


Abbildung 5-29: Summe der knotenspezifisch benötigten Transportleistungen in Tonnenkilometern und Kennzeichnung der optimalen Standorte für die definierten Rahmenbedingungen.

Für die definierten Rahmenbedingungen ergibt sich sonach unter Einbezug der Transportleistung eine Rangfolge optimaler Standorte für potenzielle Recyclingaktivitäten von R11, vor R19, vor R1, R5 und R7. Alle fünf Ergebnisse benötigen eine jährliche Transportleistung von unter 150.000 Tonnenkilometer. Auffällig ist dabei, dass alle fünf Knoten in Sachsen liegen. Dies ist insofern auch richtig, als dass diese die Knoten darstellen, die räumlich am nächsten zur größten Quelle von Altmodulen M11 liegen. Die beste Lösung generiert die räumliche Überschneidung, beziehungsweise eine Integrierung des Recyclings am Produktionsstandort M11, da dies die Einsparung der zugehörigen Transportleistung zeitigt. Als externer Standort liefert R19 die beste Lösung. Dieser überzeugt zudem durch die sehr gute Autobahnanbindung an die A14 und die A4. Die Konzentration der Lage der fünf besten Lösungen resultiert zudem daraus, dass die vier potenziellen Standorte R11, R1, R5 und R7, die zeitgleich eine Produktionsstätte darstellen, circa 58 % des gesamten jährlich verfügbaren Altmodulstromes aus dem Produktionsausschuss der Produzenten kristalliner Siliziumsolarmodule des ostdeutschen Produktionsclusters generieren.

Das Gewicht, was dieser Ballung bei der Standortwahl zukommt, soll mittels einer Variation des Einzugsgebietes unter zwei Gesichtspunkten weiter untermauert werden. In einer ersten Modifikation wird der Produktionsstandort M13 aus dem potenziellen Einzugsgebiet exkludiert, da dieser die höchste spezifische Transportleistung ins System einbringt. Das Resultat stellt sich von der Rangfolge der optimalen Standorte her ähnlich dem ursprünglichen Ergebnis dar; lediglich R5 und R1 tauschen die Plätze. Die zweite Modifikation soll die Standorte mit dem geringsten Beitrag zum annuellen Gesamtaltmodulstrom in der Region aus der Betrachtung exkludieren. Dies betrifft M10, M9 und M6 mit einem Beitrag von jeweils weniger als 10 Tonnen pro Jahr. Dies führt zum analogen Ergebnis wie die initiale Berechnung, die alle Produzenten des Clusters einbegriff. Obzwar die Exklusion markanter Knoten aus dem Beschaffungskatalog durch den starken Einfluss der regionalen Ballung der Bezugsquellen sonach kaum einen Effekt auf die Standortwahl hat, zeigt sich indessen eine Auswirkung auf die jeweiligen benötigten knotenspezifischen Gesamttransportleistungen. Dies wird aus der nachstehenden Abbildung 5-30 deutlich, in welcher sich die Ergebnisse der Berechnungen der Gesamttransportleistung für alle drei Fälle (ursprüngliche Kalkulation, Exklusion M13 sowie Exklusion M10, M9 und M6) in einem Balkendiagramm gegenübergestellt finden.

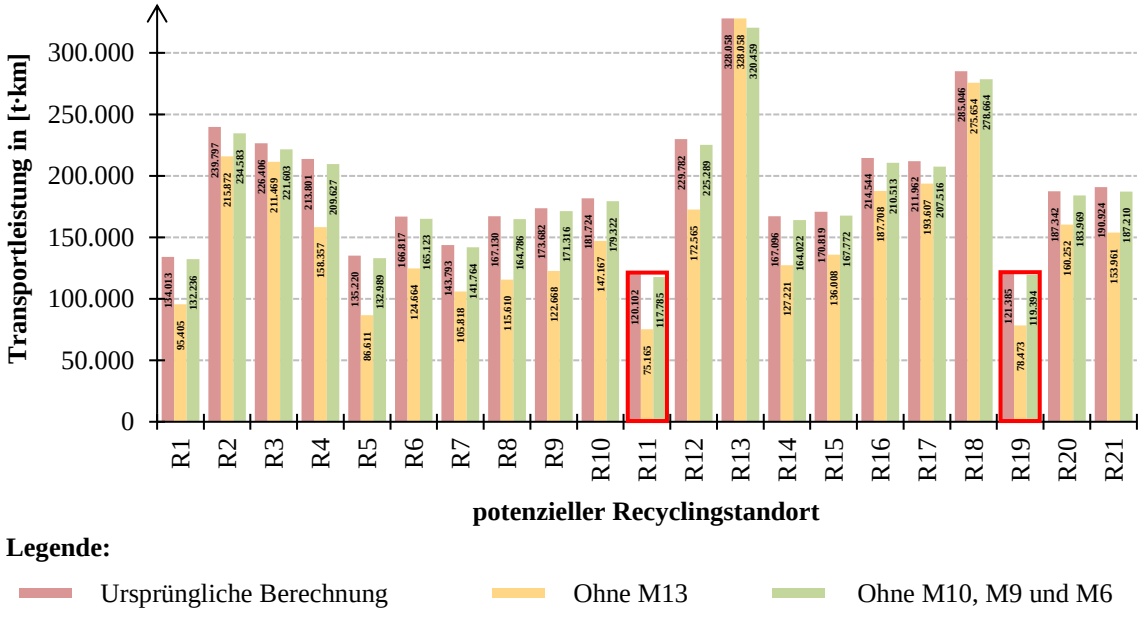


Abbildung 5-30: Gegenüberstellung der knotenspezifisch benötigten Gesamttransportleistungen in Tonnenkilometern für die Ausgangssituation und beide Modifikationen.

Besonders auffällig ist dabei die mitunter enorme Reduktion der benötigten Gesamttransportleistung für den Fall der Exklusion von M13. Für die beiden optimalen Standorte R11 und R19 würde dies eine Reduktion um 37,4 % respektive 35,35 % bedeuten. Da eine Senkung der gesamten benötigten Transportleistung infolge einer Reduzierung der Bezugsquellen in letzter Konsequenz sowohl die totalen Sammel- und Transportkosten als auch den generierbaren Gesamterlös beeinflusst, obliegt es einem potenziellen Recycler und dessen spezieller Kostenstruktur, ob sich ein Anschluss oder eine Exklusion einzelner Bezugsquellen positiv oder negativ auf seine Bilanz auswirkt und sich sonach als lohnend darstellt.

In toto zeitigt die Gewichtung mit der zu transportierenden Menge sonach einen enormen Einfluss auf die Standortoptimierung und führt zu anderen Ergebnissen als die reine Minimierung der längsten Wege.

Wie bereits angedeutet, lässt sich die zusätzliche Gewichtung der Kanten mit der zu transportierenden Menge auch durch die tatsächlich zurückzulegende Strecke substituieren. Hierfür werden die am jeweiligen Knoten der Knotenmenge *q* verfügbaren Quantitäten durch die Ladekapazitäten der Fahrzeuge geteilt, um die Anzahl der tatsächlich benötigten Fahrten zum Abtransport der Gesamtmenge zu berechnen. Diese dienen als Multiplikator für die Entfernung, da je Abholung die Kante (q;r) doppelt in die Kalkulation eingeht. Hierdurch erweitert sich die Betrachtung um die Variable Ladekapazität der Fahrzeuge. Ein mit maximal 28 Tonnen zu beladender LKW benötigt zum

Abtransport von Mengen größer der Ladekapazität weniger Fahrten, als ein LKW mit maximaler Nutzlast von 2,5 Tonnen. Eine Umrechnung der Datenbasis kann demnach durch eine Multiplikation aller Einzelwerte der jeweiligen Transportleistungen aller Kanten (Anhang 5-5) mit dem Term ($2/N_{Tr}$) erfolgen. Dabei steht die Variable N_{Tr} für die Nutzlast des Transportfahrzeuges. Der Faktor „2“ wird der benötigten Hin- und Rückfahrt gerecht. Dies gilt jedoch nur unter der vereinfachenden Annahme, dass jeder Knoten separat angefahren wird und keine knotenübergreifende Beschaffungsstrategie vorliegt. Abbildung 5-31 zeigt die Ergebnisse für verschiedene Werte von N_{Tr}. Die Bezugsquellen werden an dieser Stelle nicht variiert, da sich die Effekte ob der multiplikativen Verknüpfung mit denen bei der Betrachtung der Transportleistung gleichen würden.

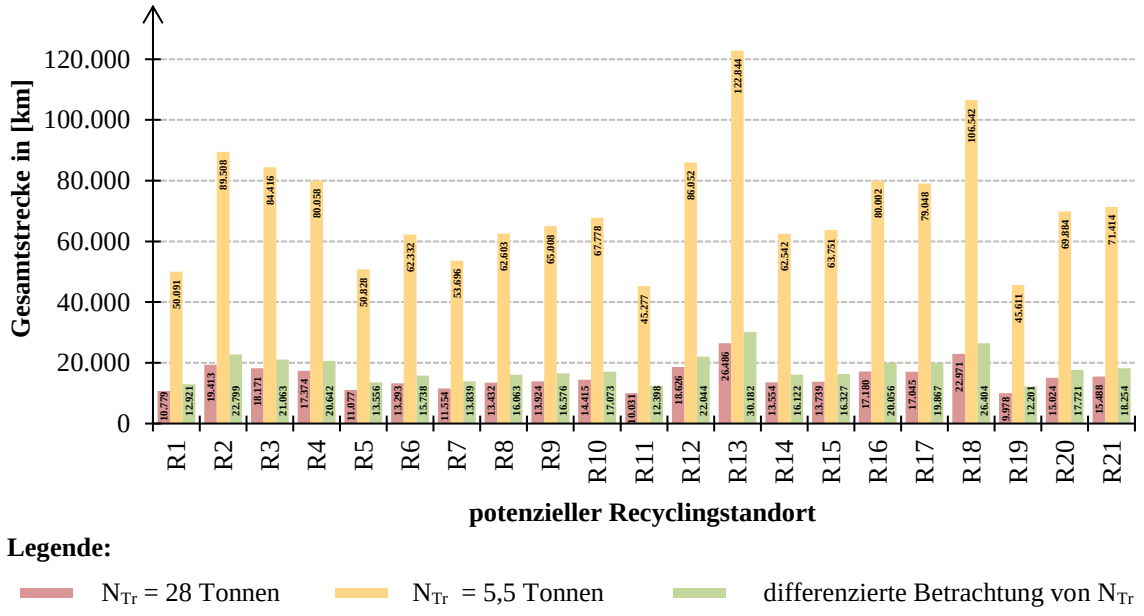


Abbildung 5-31: Abhängigkeit der tatsächlich zurückzulegenden Gesamtstrecke in Kilometern von der Ausgestaltung des Fuhrparks in Form der Wahl der zulässigen Nutzlast der Transportfahrzeuge.

Auch wenn auf den ersten Blick nicht sofort greifbar, setzt sich die Gruppe der besten fünf Standorte, die sich aus dieser Betrachtung ergeben, wiederum aus den gleichen Knoten zusammen. Auffällig ist hingegen die deutliche Abhängigkeit der gesamt zurückzulegenden Strecke von der zugrunde liegenden Nutzlast N_{Tr}. Das ist insofern auch logisch, als dass sich der Multiplikator ($2/N_{Tr}$) direkt auf alle Einzelwerte auswirkt. Eine Erhöhung der Nutzlast je Fahrt muss zwangsläufig eine Reduktion der Anzahl der Fahrten zeitigen. Dies zeigt sich eindeutig beim Vergleich der Ergebnisse für N_{Tr} = 28 t und N_{Tr} = 5,5 t. Die jeweils dritte Säule (olivgrüne Kennzeichnung) soll das Ergebnis eines differenzierenden Ansatzes liefern, wo je nach Anforderung Fahrzeuge mit N_{Tr} = 28 t und N_{Tr} = 5,5 t eingesetzt werden. Der geringfügige Wechsel der Platzierungen innerhalb der

Gruppe der besten fünf Standorte ist die Folge aus nicht voll ausgelasteten Transportfahrten. Deshalb zeigt sich der Effekt auch nur bei den beiden Knoten R11 und R19 sowie im Falle der Nutzung größerer Ladekapazitäten. Zudem weisen beide Knoten bereits in der Datenbasis der benötigten Transportleistung eine nur sehr geringe Differenz auf.

Auch wenn diese Betrachtungsweise in ihrer Gesamtheit lediglich eine Erweiterung / Variante der Betrachtung mittels der Transportleistung darstellt, kann sie beispielshalber eine Diskussion der ökologischen Wirkung der Standortwahl in Verbindung mit der Modifikation des Fuhrparkes unterstützen. Die ökologischen Auswirkungen, die sich aus der Standortwahl und der Modifikation des Fuhrparkes ergeben, sind im Gros auf die tatsächlich zu fahrenden Strecken zurückzuführen und hängen dementsprechend stark von diesem Parameter ab. Vereinfachend kann angenommen werden, dass die Reduzierung der Umweltauswirkungen infolge der Beschaffungslogistik fast proportional zur Reduzierung der kumulierten gefahrenen Strecke verläuft. Dies bestätigt auch [Choi und Fthenakis 2010]. Eine Minimierung der Transportleistung und eine Optimierung des Fuhrparkes führen sonach neben dem eigentlichen Ziel der Kostenoptimierung auch zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen. Die ökologische Betrachtung ist jedoch nicht Gegenstand dieses Kapitels, weshalb an dieser Stelle von weiteren Ausführungen abgesehen wird.

Eine reine multiplikative Verknüpfung der Transportleistung mit weiteren Variablen führt letztlich immer zur gleichen Rangfolge der optimalen Standorte unter den gegebenen Rahmenbedingungen, lediglich die absoluten Abstände zwischen den einzelnen knotenspezifischen Ergebnissen vergrößern oder verkleinern sich mit der Höhe des Multiplikanden. Genau wie die Betrachtung mittels der tatsächlich benötigten Fahrstrecke eine rein multiplikative Erweiterung des Grundansatzes Transportleistung darstellt, gilt dies in gleichem Maße für eine monetäre Bewertung.

Infolge der initialen Einschränkung des Betrachtungsrahmens auf die Existenz einer einzelnen Recyclinganlage und der Erkenntnis, dass kapazitive Restriktionen unbeachtet bleiben, ist die Suche nach dem optimalen Standort im Falle der Eigenleistung zudem vom fixen pagatorischen Kostenanteil unabhängig (abgesehen von regional unterschiedlichen Steuersätzen et cetera). Dies gilt jedoch nur bei vorher definierter Größe des Fuhrparks. Jener darf nicht infolge der Standortentscheidung variieren, da eine Veränderung sprungfixe Kosten effiziert. Sonach resultiert aus der Multiplikation der standortabhängigen benötigten Verkehrsleistung mit dem variablen Kostenanteil

(basiert auf fahrzeugspezifischen Kenndaten wie Nutzlast und Kraftstoffverbrauch als auch auf Leistungsdaten wie gefahrene Kilometer je Jahr respektive der Verkehrsleistung in Tonnenkilometer) infolge der Standortoptimierung in der Konsequenz der Knoten der Knotenmenge *r*, der den potenziellen Standort einer Recyclinganlagen mit den geringsten Systemkosten anzeigt, gleichwohl ob mit oder ohne fixen Kostenbestandteil. Dies wird aus der Annahme geschlussfolgert, dass sich die Fixkosten dieser Rubrik für jeden potenziellen Standort der Knotenmenge *r* gleichen und folglich rein rechnerisch keinen Einfluss auf das Ergebnis der Standortoptimierung haben. Aus der vorangegangenen Diskussion wird daher deutlich, dass sich die Reihenfolge der optimalen Standorte ob des multiplikativen Charakters der variablen Kosten nicht ändert und auf Basis der Transportleistung bestimmt werden kann und wurde. Wird zudem von sogenannten „Full-Truck-Loads“ ausgegangen, könnten die variablen Transportkosten je Altmodul ermittelt werden. Da dies bei den geringen Mengen an verfügbaren Altmodulen nicht vollends möglich ist, ergeben sich in Abhängigkeit der Auslastung degressive Transportkosten auf Fahrzeugebene. Sonach zeigt sich, dass zur Transportleistung proportional ansteigende Kosten realiter nicht auftreten. Die Effekte, die aus dem Transport von Teilladungen resultieren, sollen jedoch nicht diskutiert werden. Für die vorliegende Arbeit ist vielmehr der Transportvorgang an sich von zentraler Bedeutung, unabhängig von der Auslastung der Ladungskapazität.

Im Falle der Auslagerung der Beschaffungslogistik können zur Kalkulation dieser Kostenrubrik vereinfachend die durchschnittlichen Frachtraten der letzten Jahre herangezogen werden.[162] Laut [BME o.J.] hängen diese wiederum von der mittleren Entfernung ab. Für den inländischen Transport in der Entfernungsklasse bis 200 km wurde für den Zeitraum Anfang 2010 bis Anfang 2014 vom Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik e.V. eine durchschnittliche Frachtrate von 2,93 € je Fahrzeugkilometer ermittelt; entfernungsklassenübergreifend im gleichen Zeitraum circa 1,77 € je Fahrzeugkilometer. Nach [BME o.J.] bilden zur Ermittlung dieser Durchschnittswerte die real gezahlten Preise inklusive möglicher Dieselzuschläge die Datenbasis. Zudem soll es sich dabei um Preise handeln, die ihren Ursprung in langjährigen Vertragslaufzeiten haben; es handelt sich um langfristig beständige Geschäftsbeziehungen mit Rabattierung. Die angegeben Werte „[…] entsprechen somit den Preisen eines Kontraktmarktes, nicht denen eines Spotmarktes, welche erheblich abweichen können.“ [BME o.J., Seite 12]

[162] Der Transport von $gSSM_{alt}$ unterliegt keinen gesonderten Maßnahmen, da kein Gefahrguttransport et cetera vorliegt.

Diese Daten entsprechen sonach genau der in der vorliegenden Arbeit getroffenen initialen Annahme der Betrachtung des laufenden Betriebs, welcher bei einer Auslagerung der Beschaffungslogistik im Normalfall auf den Kontraktmarkt zugreift. Zu beachten ist, dass sich die angegebenen durchschnittlichen Frachtraten auf die zurückgelegte Strecke je Fahrzeug beziehen, wobei keine Differenzierung der zugrunde liegenden Nutzlast der Fahrzeuge erfolgt. Laut [BME o.J.] wurden Lastkraftwagen mit einem Ladevolumen bis 80 m³ in die Betrachtung einbezogen. Dies entsprich ungefähr dem Ladevolumen eines 40 Tonners mit einer Nutzlast N_{Tr} = 28 t.

Nachstehend soll nun eine, für die spezifische Problemstellung samt den definierten Rahmenbedingungen, exemplarische monetäre Betrachtung erfolgen. Die Kalkulation der Gesamtkosten infolge der Auslagerung der Beschaffungslogistik basiert auf folgenden Daten:

- Eine mittlere Frachtrate von 2,20 € je Fahrzeugkilometer. Grund ist, dass der Durchschnitt aller doppelt gewerteten Kanten der Entfernungsmatrix rund 370 km beträgt und somit unter der in [BME o.J.] angegebene Frachtrate für die Entfernungsklasse bis 200 km liegen muss. Die entfernungsklassenübergreifende Angabe von 1,77 € je Fahrzeugkilometer beinhaltet alle Entfernungen für den innerdeutschen Transport, auch von mehr als 600 km. Aus beiden Relationen ergibt sich folglich eine gute Näherungslösung von 2,20 € je Fahrzeugkilometer. Zur Abbildung einer gewissen Bandbreite der Frachtrate wird neben dem Mittelwert auch ein „erhöhter“ Wert von 2,50 € je Fahrzeugkilometer und ein „reduzierter“ Wert von 2,00 €/Fahrzeugkilometer als Spannbreite mit betrachtet.
- Die Daten der Abbildung 5-31 stellen den jeweiligen Multiplikator. Wenngleich diese die Einheit km besitzen und sonach von der Fahrzeugzahl unabhängig sind, kann die Einheit des Multiplikanden in € je Fahrzeugkilometer entsprechend angepasst werden. Im Gedankenmodell ist es irrelevant, ob die benötigte Gesamtstrecke von einem Fahrzeug zurückgelegt, oder ob die entsprechende Fahrleistung von einer bestimmten Fahrzeuganzahl erbracht wird.
- Um der Verteilung der in [BME o.J.] angegebenen Preise auf verschiedene Ladekapazitäten gerecht zu werden, wird sich zudem auf die Werte des Szenarios der differenzierten Betrachtung von N_{Tr} (olivgrün hinterlegte Balken der Abbildung 5-31) bezogen. Dabei gelten die angesetzten Frachtraten für alle Fahrzeugklassen gleichermaßen.

Die mittels der zuvor aufgelisteten Daten berechneten Gesamtkosten für die bezeichnete Problemstellung mit den definierten Rahmenbedingungen sind in Abbildung 5-32 für jeden potenziellen Recyclingstandort aus der Knotenmenge *r* gegenübergestellt. Im Anhang 5-6 finden sich zudem alle knotenspezifischen Einzeldaten.

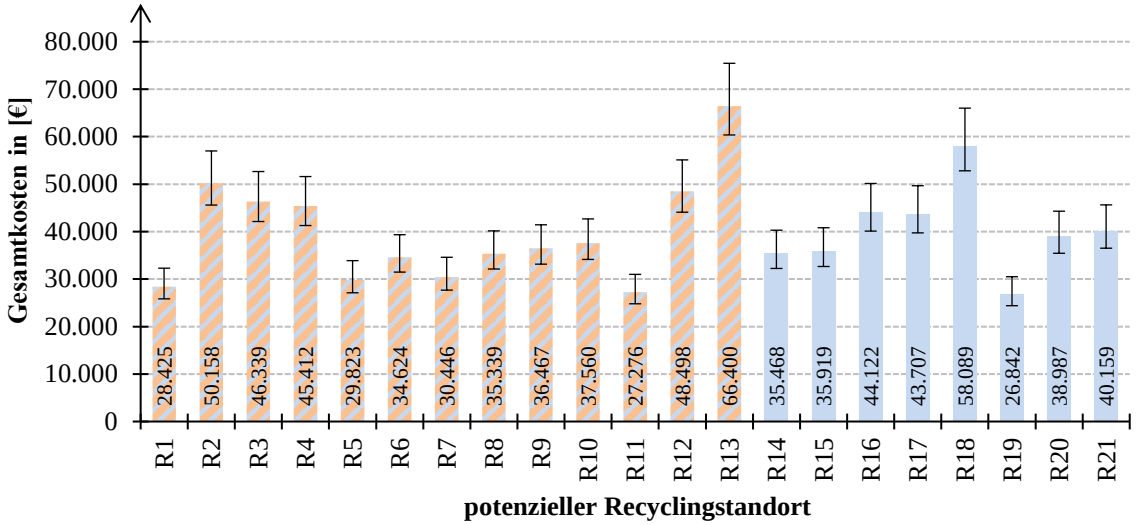


Abbildung 5-32: Exemplarische Kosten der Beschaffungslogistik bei Auslagerung für eine Bandbreite an Frachtkosten zwischen 2,00 und 2,50 € je Fahrzeugkilometer für die definierten Rahmenbedingungen.

Unter den zuvor klar definierten Rahmenbedingungen geben die jeweiligen Balken demnach die Gesamtkosten für die Rubrik der Sammel- und Transportkosten in Abhängigkeit des gewählten Standortes an. Erwartungsgemäß resultieren für die Knoten der Region, die die potenziellen Standorte R19, R11, R1, R5 und R7 einbegreift, die Minimalwerte von jährlich circa 30.000 €. Obschon dieser Wert zunächst aufgrund seines geringen Betrages unter Umständen einen fehlerhaften Eindruck hinterlassen kann, lässt sich dessen Dimension bestätigen. Laut [Kille und Schmidt 2008] und [Fraunhofer ISI o.J.] ist für den straßengebundenen Güterverkehr per LKW inklusive Maut grob mit Transportkosten von etwa 0,10 € je Tonnenkilometer zu rechnen. Diese monetäre Umrechnungsgröße kann auf die Angaben der Abbildung 5-29 zu den knotenspezifisch benötigten Gesamttransportleistungen bezogen werden, welche jedoch unter Beachtung der Hin- und Rückfahrt jeweils zu verdoppeln sind. Das Ergebnis aus dieser Multiplikation stellt ebenfalls die knotenspezifischen Gesamtkosten der ausgelagerten Beschaffungslogistik in Euro dar, welche für R19 mit 24.277 € und für R13 mit 65.612 € eine nahezu deckungsgleiche Spannbreite aufweisen. Diese Kosten erhöhen sich jedoch massiv mit einem Anstieg der annuell verfügbaren Altmodulmenge. Eine Senkung der Beschaffungslogistikkosten kann dabei unter Umständen durch den Einsatz eines eigenen Fuhrparks erzielt werden; dies unterliegt jedoch immer einer Einzelfallprüfung. Hierbei

muss allerdings eine deutliche Trennung zwischen den sprungfixen und variablen Kosten auf Mikroebene erfolgen. Die Fixkosten sichern dabei die Betriebsbereitschaft und umfassen Posten wie beispielshalber:

- Lohnkosten des Fahrpersonals inklusive Arbeitgeberanteil,
- Kfz-Versicherungen und –steuern,
- Transportversicherungen,
- allgemeine Betriebskosten (Kosten der Hauptuntersuchung oder Sicherheitsprüfungen der Fahrzeuge) sowie
- übergeordnete Bearbeitungskosten für den logistischen Planungsaufwand.

Diese weichen naturgemäß von Unternehmer zu Unternehmer ab. Hinzu kommen variablen Kosten[163], die von der tatsächlich erbrachten Leistung der Fahrzeuge abhängen. Hierzu zählen beispielshalber Kraftstoffkosten, Kosten für Schmierstoffe, Reifenkosten sowie Wartungs- und Reparaturkosten. Wie bereits andiskutiert, ist bei einer eigen geleisteten Beschaffungslogistik und unter sonst gleichen Rahmenbedingungen ebenfalls einer der ermittelten sächsischen Standorte R11 oder R19 zur Initiierung einer Recyclingaktivität zu präferieren.

Die transportlogistische Optimierung samt Standortwahl kann sonach im Falle der Eigenleistung sowie im Falle der Auslagerung zur Reduzierung der gesamten Beschaffungskosten führen. Ein ähnlicher Effekt resultiert aber auch aus der Erhöhung der Anlagenzahl, beispielshalber aufgrund der quantitativen Steigerung annuell verfügbarer Altmodulströme. Steigt die Anzahl der Recyclinganlagen im selben Einzugsgebiet, sinkt die gesamt benötigte Transportleistung als Konsequenz der Aufteilung der gesamten Knotenmenge q und damit der Reduzierung der einzelnen Einzugsgebiete. Daraus kann letztlich eine Reduzierung sowohl der aktivitätsspezifischen als auch der systemischen Beschaffungskosten resultieren, sofern optimale Bedingungen vorherrschen. Die hierfür notwendigen Optimierungsmodelle unterscheiden sich in ihrer Komplexität jedoch erheblich vom betrachteten eindimensionalen Fall. Dieserhalb werden etwaige Optimierungsansätze zur Lösung von multi-center-Problemen (oder sogenannte p-center-Probleme) sowohl für die kurz- und mittelfristige Planungsphase als auch für die langfristige Planungsphase im Kapitel 5.6 gesondert betrachtet.

[163] Laut [RISP o.J.] und [Verkehrsrundschau 2008] kann für einen LKW mit einer zulässigen Nutzlast von circa 28 Tonnen mit einem variablen Kostensatz von circa 0,50 € je Kilometer kalkuliert werden.

Allgemein gültig lässt sich im optimierten Fall jedoch festhalten, dass mit einem Anstieg der Anlagenanzahl (Quantität der Recyclingaktivitäten) die systemischen Kosten der Rückführungslogistik sinken. [Choi und Fthenakis 2014b] gehen darüber hinaus sogar von einer exponentiellen Kostenreduktion aus, welche im Gros auf die Minimierung der systemischen Transportleistung zurückzuführen ist. Durch die Verringerung der im System gesamt benötigten Fahrstrecke zeitigt eine Erhöhung der Anlagenzahl im regional begrenzten Bezugsraum des ostdeutschen PV-Produktionsclusters sonach gleichwohl eine Senkung der Umweltauswirkungen, welche aus der Beschaffungslogistik potenziell resultieren. [Choi und Fthenakis 2010] berechneten eigens für das Treibhauspotenzial, welches dem Transport von Altmodulen zukommt, eine mit der Reduzierung der Gesamtstrecke proportionale Senkung. Allerdings wird die eingesparte Strecke lediglich auf die Erhöhung der Anlagenzahl bezogen. Wird das aus mehreren Recyclern und Bezugsquellen bestehende Netzwerk transportwirtschaftlich optimiert, sind zudem Effekte zu beachten, die mit einer bezugsquellenübergreifenden Logistik oder dem Einsatz von sogenannten Nabe-Speiche-Netzwerken einhergehen. Diese können sowohl eine zusätzliche Reduktion der zugrunde liegenden Gesamtstrecken als auch eine Minderung der Quantität von Schwerlasttransporten zeitigen, was in der Summe letztlich wiederum zu einer Reduktion der transportgebundenen Umweltauswirkungen führt.

Indessen ergeben sich aus einer Erhöhung der Anlagenzahl nicht nur gesamtsystemische Vorteile, es können auch negative Effekte resultieren. Laut [Choi und Fthenakis 2010] führt beispielshalber ein Überangebot von Recyclingaktivitäten vor allem dazu, dass aufgrund des hohen Wettbewerbsdrucks durch ein Überangebot an Recyclingkapazitäten die Profitabilität der gesamten Recyclinginfrastruktur verloren gehen kann. Gleichwohl stellen sich mit einer gesteigerten Komplexität des Netzwerkes auch Fragen zur Effizienz und der Ausgestaltung des Gesamtsystems. [Choi und Fthenakis 2010] führen hier zum Beispiel Fragen nach dem Teilnehmerkreis am Netzwerk (Hersteller, Recycler, Logistikanbieter, Einzelhändler et cetera) an und welche Funktionen unter welchen Umständen ausgelagert werden können (Prüfung, Sortierung, Sammlung, Transport und so weiter). Eine Erhöhung der Anlagenzahl kann gleichwohl auch negative Auswirkungen auf die Umwelt ob der Punktemissionen der einzelnen Aktivitäten oder deren Flächenverbrauchs zeitigen. Diese sind allerdings aufgrund der genutzten Verfahrenstechnik als gering einzustufen (vgl. Kapitel 5.3) und werden durch die Einsparung infolge der Transportoptimierung mehr als kompensiert.

In toto zeigte die Diskussion dieser Kostenrubrik, dass für die kurz- und mittelfristige Planungsphase bis zum Eintreten der Massenströme um das Jahr 2028 die Kosten für die Beschaffungslogistik im Falle des Betriebes einer einzelnen Recyclinganlage ein hohes Optimierungspotenzial besitzen. Neben der grundlegenden Entscheidung einer möglichen Auslagerung der Beschaffungslogistik besitzt die Standortwahl essentiellen Charakter. Gleichwohl zeitigen die Auswahl der Bezugsquellen und eine Auslegung des Fuhrparks (bei Eigenleistung) ebenfalls großen Einfluss auf die resultierenden Kosten. Als Resultat der Untersuchung drängt sich besonders die Region um die Knoten R19, R11, R1, R5 und R7 als potenzieller Standort für das Recycling der im ostdeutschen PV-Produktionscluster jährlich anfallenden Produktionsausschüsse auf.

Neben der Standortoptimierung lässt die bisherige Betrachtungsweise auch Rückschlüsse darüber zu, ob es sich im definierten Einzelfall lohnen kann, bestimmte Bezugsquellen aus dem Beschaffungsportfolie zu exkludieren. Bei einem fixen Arbeitspunkt der Recyclingaktivität an einem vorbestimmten Anlagenstandort können sonach die Kosten für Beschaffung und Recycling, die sich für eine zu betrachtende Quelle ergeben, den daraus erzielbaren Erlösen gegenübergestellt werden. Diese übergreifende Betrachtungsweise kann in Form einer Sensitivitätsanalyse aller Knoten der Knotenmenge q erfolgen. Indessen kann eine Erhöhung der Anlagenzahl bei einer Aufteilung der Knotenmenge q und einer damit einhergehenden Reduzierung der Beschaffungskosten wiederum dazu führen, dass einem zuvor aus dem Katalog aktivitätsspezifischer Bezugsquellen ausgeschlossenem Knoten erneut eine Relevanz zukommt und dieser Teil einer Bezugsmenge wird. Ferner ufert eine Grenzwertbetrachtung des angeführten Effektes der Reduzierung der systemischen Beschaffungskosten ob der Erhöhung der Anlagenzahl letztlich darin, dass sowohl die systemischen als auch die aktivitätsspezifischen Beschaffungskosten idealisiert gegen 0 laufen, sofern für jeden Knoten $q = r$ gilt. Dies ist unter den Gegebenheiten der kurz- und mittelfristigen Planungsphase realiter jedoch nicht möglich. Wenngleich die Beschaffungskosten sonach vernachlässigbare Werte annehmen würden, würden sich die Verfahrenskosten des mengenabhängigen Arbeitspunktes aufgrund der minimalen Einzelbeiträge der jeweiligen Knoten im Gegensatz zu den erzielbaren Erlösen als unwirtschaftlich darstellen. Es zeigt sich folglich eine grundlegende Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit etwaiger Recyclingaktivitäten vom verfügbaren Massenstrom. Effekte, die jene für das Recycling potenziell vorhandenen Mengen positiv wie negativ beeinflussen, sollen dieserhalb Gegenstand des nachstehenden Kapitels sein.

5.4.4 Mengenspezifik

Gegenwärtig besteht eine klare Disproportionalität zwischen dem Stand der zur Verfügung stehenden hochwertigen verfahrenstechnischen Lösungsansätze und deren industriellen Anwendung; wenngleich aus rein technologischer Sicht keine Restriktionen existieren, die grundlegend ein hochwertiges Recycling von $gSSM_{alt}$ verhindern, wird es derzeit nicht praktiziert. Neben der notwendigen Bedingung der technischen Durchführbarkeit können indessen aber auch wirtschaftliche Missverhältnisse Hemmnisfaktoren zur Etablierung von adäquaten Strukturen darstellen. Wie aus der Diskussion der vorangegangenen Unterkapitel zu den beiden Kostenrubriken hervorgeht, zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der aktivitätsspezifischen Kosten von den jeweils zugrunde liegenden Mengen kristalliner Siliziumsolaraltmodule. Nach Formel 5-4, welche die Basis der bisherigen Diskussion bildet, ergibt sich sonach ein fundamentaler Einfluss der verfügbaren Altmodulströme auf die Wirtschaftlichkeit einer potenziellen Recyclingaktivität. Die Bewertung und kritische Diskussion der Auswirkungen der derzeitig vorherrschenden Rahmenbedingungen auf die Wirtschaftlichkeit potenzieller Recyclingaktivitäten ufert sonach letztlich in der Suche nach eben jenen Hemmnisfaktoren, die einen Übergang vom Downcycling als Status quo der Behandlung $gSSM_{alt}$ hin zu hochwertigen Recyclinglösungen verhindern respektive bislang verhinderten. Die Literatur hat darauf eine erstaunlich einfache Antwort:

So heißt es beispielshalber in [Goetzberger und Hoffmann 2010, Seite 141]: „Because of the long lifetime of modules, there was simply nothing to recycle."

[Weckend *et al.* 2016, Seite 81] erweitern diese Aussage um eine Variable; die fehlenden wirtschaftlichen Anreize: “Since currently only moderate PV waste quantities exist on the global waste market, there are not sufficient quantities or economic incentives to create dedicated PV panel recycling plants.”

Den bisherigen Ausführungen dieser Arbeit folgend, ist es zwingend notwendig die Wirtschaftlichkeit einzelner Aktivitäten in die Betrachtung mit einzubeziehen und eine differenzierte Sichtweise zu fixieren: Entweder existieren unter den derzeitigen Rahmenbedingungen nicht ausreichend annuell verfügbare Mengen, oder die betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen für einen wirtschaftlichen Betrieb (wie erzielbare Erlöse, Verfahrenskosten, Transport- und Sammelkosten) sind bei den derzeitig auftretenden Altmodulströmen nicht gegeben. Bevor jedoch im subsekutiven Kapitel 5.4.5 eine

faktorenübergreifende und zusammenfassende Analyse mit Blick auf die Rentabilitätsschwelle erfolgt, soll dieses Unterkapitel nochmals auf die Mengenbetrachtung Bezug nehmen. Auf Basis der Erkenntnisse des Kapitels 5.2 infolge der Begutachtung der historischen sowie der Prognose der zukünftigen Altmodulströme sollen nunmehr gezielt Effekte im Fokus stehen, die zusätzlich auf die annuell verfügbaren Mengen kristalliner Siliziumsolaraltmodule einwirken beziehungsweise sich in Verbindung mit den vorangegangenen Betrachtungen beider Kostenrubriken ergeben.

5.4.4.1 Weitergabe von Produktionsabfällen

Neben dem Anteil der Produktionsausschüsse in Form von $gSSM_{alt}$ am prognostizierten Altmodulstrom können auch Produktionsausschüsse in Form von fehlerhaft produzierten oder in Folge von Bruch ausgesonderten kristallinen Siliziumsolarzellen einer potenziellen Recyclingaktivität zugeführt werden. Je nach spezifischer Ausschussursache und in Abhängigkeit des entsprechenden Fertigungsschrittes können die Zellen bereits Ingredienzien wie Silber, Bismut, Aluminium et cetera mitführen. Basis der nachfolgenden Diskussion bildet daher der Inhalt des Kapitels 5.2.1.1: „Produktionsausschuss und -abfall“ ab Seite 371, worin bereits alle theoretischen Grundlagen erörtert und mögliche Ausschussraten angegeben wurden. Gleichwohl gelten alle im genannten Kapitel getroffenen Einschränkungen und Annahmen vollumfänglich.

Relevanz für dieses Kapitel besitzen sonach der Bruchausschuss kristalliner Siliziumsolarzellen beim Modulhersteller in Höhe von 1,4 %, der Bruchausschuss beim Zellenproduzenten mit 1,05 % und der Ausschuss infolge von Prozessfehlern in Form kristalliner Siliziumsolarzellen ebenfalls beim Zellenproduzenten in Höhe von 1,5 %. Die Summe der Ausschussraten beim Zellenproduzenten mit entsprechend 2,55 % kann an dieser Stelle selbst zum Zwecke der Vereinfachung nicht herangezogen werden, da die Ausschussursache per Definition grundlegend über die potenzielle Nutzung für ein Recycling zur Verwendung entscheidet. Sonach kann für ein Recycling zur Verwendung lediglich der Ausschuss kristalliner Siliziumsolarzellen infolge von Prozessfehlern einen Beitrag leisten, was 1,5 % Ausschuss beim Zellenproduzenten entspricht. Für das Recycling zur Verwertung kann indessen der gesamte Zellenausschuss genutzt werden, wobei sich jedoch der Beitrag zu den erzielbaren Erlösen aus dem Recycling in Abhängigkeit des jeweiligen Fertigungsschrittes, welcher letztlich den Ausschuss generiert, unterscheidet.

Im Falle einer geplanten Zugabe zum Recycling zur Verwendung von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen müsste jedoch sowohl eine schadenfreie Sammlung und Lagerung jeweils am Produktionsstandort und am Standort der Recyclinganlage erfolgen, als auch ein entsprechend vorsichtiger Transport zwischen beiden Standorten gewährleistet werden. Aufgrund der Fragilität der 180 µm dünnen Zellen, welche zudem nicht in einem stabilisierenden Modul eingebettet sind, ist dies entweder mit großen Verlusten verbunden oder nur mithilfe von speziellen Transport- und Sammelvorrichtungen möglich, was in der Konsequenz hohe Kosten verursacht. Dies betrifft nicht alleinig die Rückführungslogistik, sondern in besonderem Maße schon die Aussortierung während des Produktionsprozesses und die Zugabe zum Recyclingprozess. Dieserhalb wird von der Zugabe der fehlerhaft produzierten Zellen zum Recycling zur Verwendung abgesehen. Zudem ergibt sich aus der betrachtungsrelevanten Fraktion Ausschusszellen im Vergleich zum Altmodulstrom ein vernachlässigbarer weil nur marginaler Beitrag. Weiter hat dies auch keine Auswirkungen auf die zuvor angedeutete Standortwahl, da nahezu der komplette Zellenausschuss an den Modulproduktionsstandorten M11 und M12 generiert wird (siehe Tabelle 4-33, Kapitel 4.7 auf Seite 317).

Wenngleich dem Recycling zur Verwertung indessen alle Produktionsausschüsse von kristallinen Siliziumsolarzellen ungeachtet der Ausschussursache zugeführt werden können, zeigt sich auch hier lediglich ein zu vernachlässigender Beitrag. Demnach bleiben nebst den beim Zellenproduzenten generierten Ausschüssen ebenfalls die beim Modulproduzenten anfallenden mangelhaften Zellen für die nachfolgenden Betrachtungen unberücksichtigt. Zudem haben letztgenannte ingleichen keine Auswirkung auf die Standortwahl, da jedem Modulhersteller dieselbe Ausschussrate zugeschrieben wurde. Wie bereits ausführlich begründet, beeinflusst solch ein faktorieller Zuschlag die Rangfolge optimaler Standorte einer potenziellen Recyclingaktivität nicht.

Die Exklusion der Zellenausschüsse aus den betrachtungsrelevanten Stoffströmen hat darüber hinaus die Bildung einer unteren Schranke zum Resultat. Dies gilt für beide Recyclingvarianten in gleichem Maße, obschon sich ein möglicher relativer Beitrag zu den daraus erzielbaren Einzelerlösen unterschiedlich darstellt und der Zellenausschuss bei Zugabe zum Recyclingprozess eine höhere Wertdichte besitzt als die kristallinen Siliziumsolaraltmodule. Der Zellenausschuss kann sonach als Puffer interpretiert werden, ähnlich der erläuterten Handhabe mit den regional anfallenden Altmodulen am Ende der Nutzungsphase im kurz- und mittelfristigen Planungshorizont.

5.4.4.2 Zweitmarkt

Gegenstand dieses Unterkapitels ist der in den letzten Jahren wachsende Zweitmarkt für PV-Module, wobei der Begriff Zweitmarkt mitunter irreführend sein kann. Wenngleich auf Basis einzelner Module durchaus von einem Zweitmarkt zu sprechen ist, ist dieser auf Anlagenebene eher als Ersatzteilmarkt zu deklarieren. Zur Substantiierung der Begriffsdarlegung soll dieses Kapitel besonders folgende Fragen adressieren: Was ist unter dem Konzept PV-Zweitmarkt / Ersatzteilmarkt zu verstehen, welche Bezugsquellen existieren und wie wirkt sich dies auf das Recycling von kristallinen Siliziumsolaralt-modulen aus?

Zur Erläuterung des Wesens des sogenannten Zweitmarktes für PV-Module sind in erster Linie die Motivation dahinter und die prinzipiellen Zusammenhänge zu verstehen. Grundlegend lässt sich die Betrachtung darauf reduzieren, woher ein Anlagenbesitzer ein passendes Ersatzmodul für seine PV-Anlage selbst nach Insolvenz des Herstellers beziehen kann. Essentielle Bedeutung kommt dabei dem bereits ausführlich behandelten Effekt des Modulmismatching zu. Bei einem Defekt einzelner Module einer Anlage sind entweder die betroffenen Einzelmodule oder infolge einer Neuanordnung ein ganzer String zu ersetzen. Aufgrund der Vermeidung eines Modulmismatchings ergeben sich rein technisch deutliche Nachteile des Ersatzes einzelner Module. Dies liegt vor allem daran, dass ältere Modelle, falls der Defekt erst nach über 2 Jahren nach der Inbetrieb-nahme der Anlage auftritt, zumeist am regulären Markt nicht mehr angeboten werden. In diesem Fall bleibt folglich nur eine nach [Volkmann 2015] kostenintensive Reparatur, sofern dies überhaupt möglich ist, oder ein gezielter Nachbau der Module mit den spezi-fischen Leistungsdaten. Genau an diesem Punkt setzt der Zweitmarkt für PV-Module an.

Der Zweitmarkt für PV-Module bedient in toto zwei Nischen. Zum einen wird ein Markt für eben jene benötigten älteren Module, welche dem gezielten Ersatz von Einzelmodulen dienen, geschaffen. Zum anderen entsteht eine Senke für verschiedene Restbestände oder mangelhafte aber funktionstüchtige Module, welche dementsprechend nicht dem Recy-cling zugeführt werden; es ergibt sich sonach ein Spannungsfeld zwischen Zweitmarkt und Recycling. Wenngleich [Weckend *et al.* 2016] davon ausgeht, dass besonders Besitzer in der frühen Nutzungsphase einer Anlage versuchen einzelne defekte oder leistungsschwache Module auszutauschen beziehungsweise zu ersetzen, sind ebenfalls Besitzer älterer Anlagen ob der genannten Problematik eine relevante Zielgruppe. Dementsprechend wächst das Marktvolumen mit voranschreitender Installationshistorie.

Neben dem Defekt einzelner Module können auch der Diebstahl von Anlagenkomponenten, der Austausch einzelner leistungsschwacher Module oder die Beeinträchtigung aufgrund von Umwelteinflüssen die Nutzung des Zweitmarktes zeitigen. Anhand der Belange der Zielgruppe wird folglich deutlich, weshalb sich eher die Begrifflichkeit eines Ersatzteilmarktes aufdrängt.

Laut [Fiedler 2013] bietet sich ein weites Spektrum potenzieller Quellen zum Bezug adäquater Module dar. Hierzu zählen vor allem Neuprodukte, wie:

- B-Ware vom Hersteller oder Lagerrestbestände,
- Lagerware und Restposten von Händlern und
- Insolvenzmassen,

als auch gebrauchte Module, solange keine schwerwiegenden Defekte wie Glasbruch, Delaminierung, Hotspots oder Schmorstellen auftreten, aus:

- Versicherungsfällen (Hagel- und Sturmschäden),
- Rückrufaktionen von Herstellern,
- Repoweringmaßnahmen oder Anlagenoptimierungen sowie
- Demontagen am Laufzeitende.

Namenhafte Onlinemarktplätze werden betrieben von Firmen wie beispielshalber der SecondSol GmbH inklusive Solarodo und Sunkauf, der pvXchange Trading GmbH und der eBay International AG. Eine tatsächliche Leistungsprüfung, Überarbeitung und Defektbeseitigung wird indessen von Subunternehmern realisiert. Neben den geringeren Kosten, die laut [Auer 2015] und [Volkmann 2015] ein gezielter Austausch einzelner Module einer PV-Anlage im Vergleich zum Tausch eines kompletten Strings effiziert, kann eine Etablierung solcher Ersatzteilmärkte auch positive Effekte für die Umwelt zeitigen. Diese äußern sich in Form von Abfallvermeidung und der Minderung der Ressourcennutzung um den Betrag jener wiedergenutzten Module.

Die Auswirkungen auf die Prognose des annuellen Altmodulstromes infolge der Etablierung dieser Ersatzteilmärkte sind jedoch ebenfalls als vernachlässigbar gering einzustufen. Einerseits greift der Ersatzteilmarkt teilweise auf andere Quellen als das Recycling zu. So wurden beispielshalber Lagerrestbestände, Insolvenzmassen oder Rückrufaktionen nicht in das Prognosemodell mit einbezogen. Dies ist unter den derzeitigen Bedingungen auch insofern richtig, als dass die Quellen mit der Veräußerung betreffender Module an die Ersatzteilmärkte einen zusätzlichen Wert generieren können. Andererseits wurden potenzielle Wechselwirkung bereits partiell im Prognosemodell beachtet (siehe

Fußnote 134, Kapitel 5.2.1.3 auf Seite 409 und zugehörige Diskussion). Zudem sind etwaige Wechselwirkungen mit den verfügbaren Produktionsausschüssen, besonders hinsichtlich der kurz- und mittelfristigen Planungsphase, als minimal anzusehen. Im Zuge der Etablierung eines wirtschaftlich lohnenden und qualitativ hochwertigen Recyclings können sich die Wechselwirkungen respektive das Spannungsfeld jedoch verstärken. Allerdings ist dies insbesondere für die langfristige Planungsphase mit Einsetzen der Massenströme als nicht bedeutungsvoll oder erwähnenswert einzustufen.

5.4.4.3 Kapazitäten der Recyclingaktivitäten

Die Auswirkungen der lediglich marginalen Erhöhung beziehungsweise Senkung des verfügbaren annuellen Altmodulaufkommens im Zuge der beiden vorbenannten Effekte reduzieren sich aufgrund der gegenseitigen Wechselwirkung weiter. Es ist sonach weder von einem Einfluss auf die im Kapitel 5.2 prognostizierten Werte noch auf die Standortwahl in der kurz- und mittelfristigen Planungsphase (Kapitel 5.4.3.2) auszugehen. Dieserhalb behalten die bereits prognostizierten nationalen wie regionalen Altmodulströme vollumfänglich Geltung und bleiben sonach auch trotz der Existenz jener vorbezeichneten Einflüsse unverändert. Da sich dieses Unterkapitel mit Annahmen vorzuhaltender Kapazitäten der potenziellen Recyclingaktivitäten auseinandersetzt, sind entsprechend die in den Anhängen 5-2 bis 5-4 aufgeführten Einzelwerte auf Basis des im Kapitel 5.2 aufgestellten Prognosemodells als Datengrundlage anzusehen. Allerdings geben die Prognosewerte das Gesamtaltmodulaufkommen aus, weshalb sich die Diskussion etwaiger Kapazitätsangaben vorrangig auf die langfristige Planungsphase bezieht - sofern nicht explizit Abweichungen angegeben werden. Die Umrechnung der Einzelwerte von MW_p in Tonnen erfolgt wiederum mittels des Faktors 84,39 g/W_p.

Zur Sicherung der Wirtschaftlichkeit potenzieller Recyclingaktivitäten können mithilfe des Prognosemodells in Abhängigkeit einer festgelegten Kapazität das obligate Einzugsgebiet skaliert, der entsprechende Zeitpunkt zur Prozessinitiierung bestimmt sowie etwaige zukünftige Risiken identifiziert werden. Dies soll sowohl auf nationaler Ebene als auch in den bereits definierten regionalen Grenzen von Sachsen samt deutschseitiger Anrainer, vom ostdeutschen PV-Produktionsclusters und des Raumes Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen erfolgen. Die Diskussion potenzieller Kapazitätsbeschränkungen bleibt dabei jedoch von etwaigen monetären Einflüssen oder Abhängigkeiten unberührt; die Betrachtung trägt sich alleinig auf Mengenebene zu.

Alle abgeleiteten Kapazitätsangaben basieren auf konservativen Schätzungen zur Bildung von unteren Schranken. Zudem ist allen Werten entweder ein geschlossener oder ein offener Definitionsbereich mit zugeordnet. Der geschlossene Definitionsbereich drückt aus, zwischen welchen Jahren der Bezugswert uneingeschränkt Geltung besitzen soll. Beim offenen Pendant wird lediglich ein „Startjahr“ t_{Start} als Anfangskriterium bestimmt. Die zugehörige Kapazitätsangabe soll dann uneingeschränkt für den gesamten, auf t_{Start} folgenden Prognosezeitraum bis zum Jahr 2111 gelten. Die Bezeichnung „risikofreier“ Wert kennzeichnet die annuelle Prognosemenge, deren Unterschreitung nach dem Jahr t_{Start} (offener Bereich) oder innerhalb einer definierten Zeitspanne faktisch ausgeschlossen wird; eine aktivitätsspezifische Recyclingkapazität mit diesem Wert kann sonach innerhalb des jeweils zugrunde liegenden regionalen Einzugsgebietes und unabhängig etwaiger monetärer Einflüsse zu 100 % ausgelastet werden. Die mengenbasierte Betrachtung bleibt zudem losgelöst von etwaigen saisonalen Schwankungen. Zudem gelten alle Werte nur im Falle eines Recyclings zur Verwertung vollumfänglich; für ein Recycling zur Verwendung sind diese mit einem Faktor F_a von 0,75 ob der Abhängigkeit von der Inputqualität abzuwerten.

Aus der Prognose der zu erwartenden jährlichen nationalen Altmodulströme ergibt sich bei konservativer Schätzung ab dem Jahr 2036 als t_{Start} für den offenen Geltungsbereich ein risikofreies Angebot von jährlich 50.600 t kristalline Siliziumsolaraltmodule. Sollte auf lange Sicht eine kurzfristige Auslastung über 80 % wirtschaftlich vertretbar sein (nachfolgenden mit K_{80} gekennzeichnet), können zudem Kapazitäten von 67.500 t je Jahr als realistischer Wert angesehen werden. Diese sind darüber hinaus zwischen den Jahren 2036 und 2069 ebenfalls als risikofrei zu bezeichnen. Im Zeitraum von 2040 bis 2052 sind sogar Kapazitäten mit rund 110.000 t je Jahr risikofrei auszulasten. Wenngleich nicht unter der Definition „risikofrei“ zu führen, aber trotzdem als gesichert anzusehen, kann diese Kapazitätsgrenze im selben Zeitraum auch auf jährlich über 125.000 t angehoben werden. Gesichert deshalb, da rein rechnerisch noch Reserven von 17.000 t je Jahr existieren (im Falle des risikofreien Wertes sind die Reserven doppelt so hoch). Diese Reserven können abgesehen von der Senkung eines unternehmerischen Risikos im entsprechenden Bereich aktivitätsspezifischer Kapazitäten auch zu einer Ausdehnung der vorgegebenen Zeitspanne dienen. Im kurz- und mittelfristigen Planungszeitraum bis zum Jahr 2028 sollte eine Anlagenkapazität für eine Vollauslastung indessen nicht über 5.150 t jährlich betragen – bei Nutzung aller potenziell möglichen Bezugsquellen.

Je nach Grad der Regionalisierung sinken diese Werte respektive Schranken entsprechend. Für das ostdeutsche PV-Produktionscluster ist beispielshalber von folgenden Werten auszugehen. Die Anlagenkapazität, die risikofrei ausgelastet werden kann (nachfolgend mit K_{rf} abgekürzt), ergibt sich zu jährlich 5.100 Tonnen. Dies gilt für das Jahr 2036 und aufwärts. Der K_{80}-Wert liegt bei 7.600 Tonnen je Jahr. Ähnlich der vorangegangenen nationalen Betrachtung ergibt sich für den Zeitraum 2040 bis 2054 ein Maximum. Der zugehörige risikofreie Wert (Kennzeichnung mittels $K_{rf,m}$) beträgt circa 12.500 Tonnen je Jahr, der höher liegende und trotzdem als gesichert anzusehende Wert (wird nachfolgend als gesicherter Wert be- und mit $K_{g,m}$ gekennzeichnet) bei jährlich knapp 17.000 Tonnen. Die annuellen Reserven liegen bei 6.750 t respektive 2.500 t. Beiden Werten wird zur Kennzeichnung der Index r für Reserve zugeordnet. Für die kurzfristige Planungsphase ist ein Wert von 1450 Tonnen je Jahr bei einer geplanten Vollauslastung nicht zu überschreiten.

Für eine übersichtliche Gegenüberstellung fasst Tabelle 5-21 für alle im Kapitel 5.2 diskutierten Beispielregionen die zugehörigen Werte zusammen. Zum Zwecke der besseren Zuordnung werden die bereits enumerierten Werte für die nationale Schätzung als auch für die Schätzung im Rahmen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters mit aufgeführt. Gleichwohl orientiert sich die Bezeichnung und Kennzeichnung der charakteristischen Angaben an den beiden vorangegangenen Absätzen.

Tabelle 5-21: Charakteristische Werte kristalliner Siliziumsolaraltmodulströme für verschiedene Regionalisierungen.

Charakteristische Kenngrößen verschiedener Regionalisierungen		Kurz-fristig	Offener Definitionsbereich			Geschlossener Definitionsbereich (Maximalbereich)			
		K_{rf}	K_{rf}	K_{80}	ab	$K_{rf,m}$ (K_r)	$K_{g,m}$ (K_r)	von	bis
Einheit		Tonnen je Jahr	Tonnen je Jahr	Tonnen je Jahr	Jahr	Tonnen je Jahr	Tonnen je Jahr	Jahr	Jahr
Region	**Deutschland**	5.150	50.600	67.500	2036	110.000 (34.000)	125.000 (17.000)	2040	2052
	Sachsen samt deutschseitiger Anrainer	2.850	25.500	33.500	2036	50.500 (21.100)	67.500 (4.200)	2042	2053
	Ostdeutsches PV-Produktionscluster	1.450	5.100	7.600	2036	12.500 (6.750)	17.000 (2.500)	2040	2054
	Sachsen	760	2.530	3.375	2036	5.065 (1.690)	6.330 (422)	2040	2054
	Thüringen	320,7	1.690	2.450	2038	3.375 (1.690)	4.640 (422)	2045	2059
	Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen	42,2	338	590	2034	1.265 (844)	1.690 (422)	2040	2053

Die angegebenen Kapazitäten sind nicht anlagengebunden. Demnach ist es für eine Vollauslastung unerheblich, ob die angezeigten kapazitätsbezogenen Grenzwerte von einer Anlage im jeweiligen regionalen Einzugsgebiet beansprucht beziehungsweise ausgereizt werden, oder ob dies der Summe der einzelnen Kapazitäten aller Anlagen in der Bezugsregion entspricht. Vor diesem Hintergrund soll die Betrachtung nochmals in umgekehrter Weise erfolgen und auf den Erkenntnissen der Tabelle 5-21 aufbauen.

Wird den Werten der Tabelle 5-21 im Sinne eines konservativen Ansatzes zum wirtschaftlichen Betrieb einer Recyclinganlage Grenzwertcharakter zugeschrieben, lassen sich aus vordefinierten Kapazitäten einzelner Recyclingaktivitäten neben den sich daraus ableitenden minimalen Einzugsgebieten auch Rückschlüsse auf die potenzielle Anlagenquantität ziehen. Der weiteren Diskussion liegen die in Tabelle 5-22 auf der nachfolgenden Seite aufgeführten Ergebnisse zugrunde. Basis bilden vordefinierte aktivitätsspezifische Kapazitäten von jährlich 1.000, 2.500, 5.000, 10.000, 20.000 und 50.000 Tonnen für vollwertige industrielle Anlagen; in ausgewählten Fällen und in Anlehnung an [Choi und Fthenakis 2014b] eine Kapazität von 185 Tonnen je Jahr als Pilotanlage. Der Betrieb von Pilotanlagen wird jedoch lediglich für die kurz- und mittelfristige Planungsphase als Option mitbetrachtet. Die in der Tabelle angegebenen Zellenwerte können für Ausprägungen ≥ 1 als Anzahl von Anlagen in der jeweiligen Bezugsregion angesehen werden, die bei Nutzung sämtlicher Altmodulquellen der fixierten Region unter Vollauslastung betrieben werden können. Für Ausprägungen < 1 sind sie indessen als Auslastung der vorgeschriebenen Gesamtkapazität in % zu interpretieren. Für das Beispiel des ostdeutschen PV-Produktionsclusters (orange hinterlegte Spalte der Tabelle 5-22) lässt sich sonach festhalten:

- In der kurz- und mittelfristigen Planungsphase könnte maximal eine Anlage mit einer jährlichen Gesamtkapazität von 1.000 t/a vollausgelastet betrieben werden, wohingegen bei höheren aktivitätsspezifischen Kapazitäten (ab 1.450 t/a) keine Vollauslastung garantiert werden kann. Eine Recyclinganlage mit einer jährlichen Kapazität von beispielshalber 5.000 Tonnen wäre lediglich zu circa 29 % auszulasten. Indessen können für diese Rahmenbedingungen (regionaler Fokus und zeitliche Begrenzung) 7 Pilotanlagen installiert werden, welche dem erweiterten Forschungsbedarf, der dieser Planungsphase bereits zugesprochen wurde, gerecht werden können.

Tabelle 5-22: Auslastung beziehungsweise Anzahl potenzieller Recyclingaktivitäten in Abhängigkeit der regionalen Bezugsgrenzen und der zugrunde liegenden jährlichen Anlagenkapazität.

Auslastung bzw. Anzahl Recyclingaktivitäten je Region			Region					
	Kapazität [Tonnen je Jahr]	**Kenngröße**	**Deutschland**	**Sachsen samt deutschseitiger Anrainer**	**Ostdeutsches PV-Produktionscluster**	**Sachsen**	**Thüringen**	**Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen**
Kurzfristig	**185**	K_{rf}	27,84	15,41	7,84	4,11	1,73	0,23
	1.000		5,15	2,85	1,45	0,76	0,32	0,04
	2.500		2,06	1,14	0,58	0,30	0,13	0,02
	5.000		1,03	0,57	0,29	0,15	0,06	0,01
	10.000		0,52	0,29	0,15	0,08	0,03	0,00
	20.000		0,26	0,14	0,07	0,04	0,02	0,00
	50.000		0,10	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00
Offener Bereich	**1.000**	K_{rf}	50,60	25,50	5,10	2,53	1,69	0,34
		K_{80}	67,50	33,50	7,60	3,38	2,45	0,59
	2.500	K_{rf}	20,24	10,20	2,04	1,01	0,68	0,14
		K_{80}	27,00	13,40	3,04	1,35	0,98	0,24
	5.000	K_{rf}	10,12	5,10	1,02	0,51	0,34	0,07
		K_{80}	13,50	6,70	1,52	0,68	0,49	0,12
	10.000	K_{rf}	5,06	2,55	0,51	0,25	0,17	0,03
		K_{80}	6,75	3,35	0,76	0,34	0,25	0,06
	20.000	K_{rf}	2,53	1,28	0,26	0,13	0,08	0,02
		K_{80}	3,38	1,68	0,38	0,17	0,12	0,03
	50.000	K_{rf}	1,01	0,51	0,10	0,05	0,03	0,01
		K_{80}	1,35	0,67	0,15	0,07	0,05	0,01
Maximalbereich (geschlossen)	**1.000**	$K_{rf,m}$	111,00	50,50	12,50	5,07	3,38	1,27
		$K_{g,m}$	125,00	67,50	17,00	6,33	4,64	1,69
	2.500	$K_{rf,m}$	44,40	20,20	5,00	2,03	1,35	0,51
		$K_{g,m}$	50,00	27,00	6,80	2,53	1,86	0,68
	5.000	$K_{rf,m}$	22,20	10,10	2,50	1,01	0,68	0,25
		$K_{g,m}$	25,00	13,50	3,40	1,27	0,93	0,34
	10.000	$K_{rf,m}$	11,10	5,05	1,25	0,51	0,34	0,13
		$K_{g,m}$	12,50	6,75	1,70	0,63	0,46	0,17
	20.000	$K_{rf,m}$	5,55	2,53	0,63	0,25	0,17	0,06
		$K_{g,m}$	6,25	3,38	0,85	0,32	0,23	0,08
	50.000	$K_{rf,m}$	2,22	1,01	0,25	0,10	0,07	0,03
		$K_{g,m}$	2,50	1,35	0,34	0,13	0,09	0,03

- Im offenen Definitionsbereich, der sich ausschließlich auf die langfristige Planungsphase bezieht, lässt sich dahingegen in den Bezugsgrenzen der fokussierten Region eine Recyclinganlage einer jährlichen Kapazität von 5.000 Tonnen risikofrei betreiben – zumindest was die potenzielle Auslastung betrifft. Eine Skalierung über 5.000 Tonnen je Jahr würde zu Minderauslastungen führen. So führt eine Verdopplung der aktivitätsspezifischen Kapazität auf 10.000 Tonnen je Jahr selbst auf Basis des K_{80}-Wertes nur zu einer 76 % Auslastung im Minimum. Die Kapazität von 1.000 t/a der einzelnen Recyclinganlage aus der kurz- und mittelfristigen Planungsphase für die betrachtete Region lässt sich sonach ab dem Jahr 2036 entweder verfünffachen (Kapazitätserweiterung) oder durch 4 gleichwertige Anlagen ergänzen (Expansion).
- Im Zeitraum zwischen 2040 und 2054[164] ist sogar der Betrieb einer Anlage mit einer Kapazität von jährlich 10.000 Tonnen bei reiner Mengenbetrachtung als unbedenklich einzustufen. Darüber hinaus kann auf Basis des $K_{g,m}$-Wertes kurzfristig der gesicherte Betrieb von 3 Anlagen mit voll ausgelasteten Kapazität von jeweils 5.000 Tonnen pro Jahr realisiert werden.

Da sich realiter die Bezugsquellen einer Recyclinganlage nicht mit einer fiktiv abgegrenzten Region decken, sind besonders in der langfristigen Planungsphase die jeweiligen Installationshistorien für das tatsächlich verfügbare Altmodulaufkommen entscheidend. Allerdings lassen sich anhand der Tabelle 5-22 erste Anhaltspunkte zur Dimension des desideraten Einzugsgebietes generieren. Wird im Zuge einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung deutlich, dass zur Überschreitung einer aktivitätsspezifischen Gewinnschwelle eine Mindestkapazität notwendig ist, lässt sich das benötigte Einzugsgebiet skalieren und dementsprechend eine transportwirtschaftliche Untersuchung (Standortoptimierung) durchführen. Wird beispielshalber der in Abbildung 5-27 auf Seite 533 (Kapitel 5.4.3.1) aus der Literatur extrahierte Schwellenwert einer Kapazität von mindestens 19.000 Tonnen je Jahr betrachtet, lässt sich daraus für die langfristige Planungsphase ein Mindesteinzugsgebiet ähnlich der Region Sachsen samt deutschseitiger Anrainer ableiten. Für die kurz- und mittelfristige Planungsphase ergäbe sich hierfür selbst auf nationaler Ebene die reelle Gefahr einer Auslastung von lediglich 26 %.

[164] Unter Einbezug von Lagerhaltung und Nutzung der vorhandenen regionalen Reserven (K_r) kann sich dieser Zeitraum auch über das Jahr 2054 hinaus erstrecken.

Besonders mit dem Fokus auf Sachsen lässt sich aber auch eine weitere Erkenntnis schlussfolgern, die einen zentralen Aspekt dieser Arbeit darstellt. Werden die Ergebnisse der Standortoptimierung mit den Werten der Tabelle 5-22 verknüpft, lässt sich folgendes festhalten: Wird im Verlauf der kurz- und mittelfristigen Planungsphase ein Recycling der Produktionsabfälle des ostdeutschen PV-Produktionsclusters initiiert, ist für das Ziel der Vollauslastung eine maximale Kapazität von maximal 1.450 Tonnen je Jahr zugrunde zu legen. Der Standort dieser Anlage beschränkt sich infolge der Standortoptimierung auf die Region um die Knoten R19, R11, R1, R5 und R7. Mit Eintreten der Massenströme und dem Überschreiten des Jahre 2036 kann aufgrund der zentralen Lage dieses Standortes auch in der Region Sachsen samt deutschseitiger Anrainer davon ausgegangen werden, dass sich dieser für eine Kapazitätserweiterung auf 20.000 Tonnen je Jahr unter Vollauslastung anbietet und weiterhin auch transportwirtschaftlich gute Ergebnisse erzielen kann. Wird nur Sachsen als Einzugsgebiet präferiert, wäre trotzdem eine Kapazitätserweiterung auf 2.500 Tonnen je Jahr möglich. Wie eingangs bereits erwähnt, gelten diese Werte für ein Recycling zur Verwertung und sind für ein Recycling zur Verwendung mit dem eingeführten Faktor F_a von 0,75 zu multiplizieren.

Diese Erkenntnisse besitzen für eine Betrachtung von wirtschaftlichen Schwellenwerten in regionalen Grenzen ob der deutlichen Abhängigkeit der aktivitätsspezifischen Kosten und der erzielbaren Erlöse – in toto der Gewinnschwelle – von den jeweils zugrunde liegenden Mengen kristalliner Siliziumsolaraltmodule essentiellen Charakter.

5.4.5 Übergreifende Betrachtungen

Im Verlauf der bisherigen Diskussion drängten sich erste Verdachtsmomente auf, die besonders der Unwirtschaftlichkeit etwaiger Recyclingaktivitäten das Potenzial für die historische und gegenwärtige Disproportionalität zwischen dem Stand der für ein hochwertiges Recycling von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen zur Verfügung stehenden Technik und deren konkreten industriellen Einsatz attestieren. Mit Fokus auf den „laufenden“ Betrieb wurde dies bislang mit einem Unterschreiten der aktivitätsspezifischen Gewinnschwelle in Abhängigkeit des jährlich nutzbaren Altmodulaufkommens in Verbindung gebracht. Grundlage der Betrachtungen bildete dabei Formel 5-4, deren einzelne Terme Gegenstand der vorangegangenen Unterkapitel waren. Diese gezielte weil separate Analyse jener Terme besitzt zwar für die Generierung einer adäquaten Diskussionsbasis als auch zur Bestimmung termspezifischer Effekte und deren Auswirkungen essentiellen Charakter, zur umfänglichen Untersuchung etwaiger Ursachen für eine potenzielle Unwirtschaftlichkeit einzelner Recyclingaktivitäten eignet sie sich indessen nicht. Obgleich die Unterschreitung der Gewinnschwelle de facto stets die Folge von termspezifischen Einflüssen wie niedrigen Primärrohstoffpreisen und damit sinkenden Absatzerlösen oder hohen Verfahrenskosten (schließt beispielshalber hohe Energiekosten mit ein) ist, kann nur eine differenzierte und vergleichende Betrachtung diese Effekte ins Verhältnis setzen und sonach übergreifende Restriktionen sowie Hemmnisfaktoren identifizieren. Wird von der aktivitätsspezifischen Sichtweise abgewichen, kann zudem deutlich werden, dass bestimmte Kombinationen der einzelnen Effekte respektive deren Wechselwirkungen eine Unwirtschaftlichkeit einzelner Aktivitäten effizieren; es lassen sich gegebenenfalls systemrelevante Schranken definieren. Gleichwohl können solche Ergebnisse in der Konsequenz einen enormen Erkenntniszugewinn darstellen, welchem für den derzeitigen Stand der Forschung eine hohe Brisanz zukommt.

Hauptgegenstand dieses Kapitels ist sonach die Gegenüberstellung und die Diskussion wechselseitiger Beziehungen der Erkenntnisse aus den Kapiteln 5.4.2 bis 5.4.4. Hierfür wird zuvörderst die zugrunde liegende Formel 5-4 wieder aufgegriffen und auf Basis jener Ergebnisse angepasst beziehungsweise modifiziert. In einem primären Schritt wird diese modifizierte Betrachtungsgrundlage dann einer allgemeinen mathematischen Analyse unterzogen, um erste abstrakte Zusammenhänge zu verdeutlichen. Daran schließt sich eine Betrachtung einer spezifischen statischen Problemstellung an. Hierbei werden gezielt einzelne Einflussfaktoren variiert. Ziel ist zum einen die Überprüfung der

Ergebnisse der allgemeinen Betrachtung sowie die Identifikation problemspezifischer Restriktionen. Darauf aufbauend erfolgt eine Überführung in eine dynamische Betrachtung, der letztlich eine zentrale Bedeutung zukommt. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse wiederum genutzt, um eine fallspezifische Überprüfung zu realisieren.

Zum Angleich der Diskussionsbasis an die bereits gewonnenen Erkenntnisse soll nun die bereits auf Seite 514 angeführte Formel 5-4 modifiziert werden. Für eine erleichterte Zuordnung findet sie sich nachstehend nochmals dargestellt, inklusive der Zuordnung der entsprechenden Unterkapitel:

$$\underbrace{\sum_{i=1}^{n}(P_i * I_i) * x}_{Kapitel\ 5.4.2} = \underbrace{(Vk_V * x + VK_{fix})}_{Kapitel\ 5.4.3.1} + \underbrace{(Tk_V * x + TK_{fix})}_{Kapitel\ 5.4.3.2} \qquad \textbf{Formel 5-4}$$

Wie in den beiden Kapiteln zu den rubrizierten Kostentermen deutlich geworden ist, konnten diese weder in ihre variablen noch fixen Kostenbestandteile zerlegt werden. Weiter wurden keine allgemeingültig skalierbaren Beziehungen ermittelt. Dementgegen konnten indessen in beiden Fällen zumindest auf Gesamtkostenebene aktivitätsspezifische Kosten kalkuliert werden. Für die Rubrik der Verfahrenskosten ergab sich darüber hinaus eine mathematische Abhängigkeit der aktivitätsspezifisch fixierten Kapazität und der potenziellen jährlichen Gesamtkosten. Im Falle der Rubrik der Sammel- und Transportkosten konnten gleichwohl für spezifische Problemstellungen die Kosten der Beschaffungslogistik kalkuliert werden. Die Prädiktion dieser Kosten auf Ebene annueller Gesamtkosten im Rahmen einer Abhängigkeit von der jährlichen Bezugsmenge war jedoch bisher nicht realisierbar. Wenngleich sonach eine Berechnung der Gesamtkosten dieser Rubrik für jeden zu betrachtenden Einzelfall separat notwendig ist, kann analog der Rubrik der Verfahrenskosten ebenfalls von der Existenz eines mathematisch beschreibbaren Zusammenhanges ausgegangen werden. Dieserhalb wird die Darstellung der Formel 5-4 für die beiden Kostenrubriken in dem Sinne modifiziert, als dass beide durch die jeweilige (im Falle der Verfahrenskosten nachgewiesene und für die Sammel- und Transportkosten vermutete) mathematische Abhängigkeit von der Bezugsmenge substituiert werden. Die Kostenseite ergibt sich sonach zu:

$$Kosten = VK(x) + TK(x) \qquad \textbf{Formel 5-9}$$

Darüber hinaus ist für die Bezugsgröße *x* sowohl in den eben angedeuteten kostenseitigen mathematischen Abhängigkeiten als auch Erlösseitig bei der Kalkulation des sich aus der Bezugsmenge ergebenden möglichen Gesamterlöses nach der Art des Recyclings zu differenzieren. Wie bereits im Kapitel 5.4.4.3 diskutiert und im Kapitel 5.3 zu den technischen Grundlagen des Recyclings kristalliner Siliziumsolaraltmodule ausführlich begründet, ist die Bezugsgröße für den Fall des Recyclings zur Verwendung ob der Abhängigkeit von der Inputqualität abzuwerten. Dies soll mittels des Faktors F_a erfolgen, welchem der Wert 0,75 zugeschrieben wurde. Zur eindeutigen Zuordnung wird nachstehend das Recycling zur Verwendung mit dem Index VN gekennzeichnet; das entsprechende Pendant zur Verwertung mit VR (gilt sowohl für die zugehörigen Variablen als auch für die Bezeichnung selbst). Da das Recycling zur Verwertung nicht von der Inputqualität abhängt, muss folglich gelten:

$$x = x_{VR} \qquad \textbf{Formel 5-10}$$

Die Gesamtmenge, die für das Recycling zur Verwendung ($Recycling_{VN}$) verfügbar ist, ergibt sich sonach zu:

$$x_{VN} = F_a * x = F_a * x_{VR} \qquad \textbf{Formel 5-11}$$

Grundlegend soll durch diese Formel nur die Beziehung beider Bezugsgrößen beschrieben werden. Aktivitätsspezifische Angaben oder Berechnungen beziehen sich weiterhin auf die Menge $gSSM_{alt}$, welche dem Prozess zugeführt werden.

Auf der Erlösseite ist die Formel 5-4 ebenfalls um einen Faktor zu erweitern: den Sicherheitsfaktor S_E. Dieser erfüllt mehrere Aufgaben. Zum einen soll er Unsicherheiten und Ungenauigkeiten bezüglich künftiger Marktentwicklungen (sogenannte Preisrisiken) abfedern und in diesem Zusammenhang gleichwohl kurzfristigen und imponderablen Preisschwankungen gerecht werden. Er zielt demnach direkt auf den Faktor P_i ab und soll zudem gewährleisten, dass die Sekundärrohstoffe aus dem Recycling der kristallinen Siliziumsolaraltmodule einen niedrigeren Marktpreis als ihre neuwertigen Pendants generieren. Der erzielbare Marktpreis der recycelten Materialien stellt eine entscheidende Variable der Wirtschaftlichkeit potenzieller Aktivitäten dar [Park *et al.* 2016]. Es ergibt sich im Zuge dieser faktorbasierten Minderung eine untere Schranke, die im Sinne einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein desiderates Minimum wiederspiegelt. Zum anderen soll dieser Sicherheitsfaktor die benötige Marge (mindestens 15 %) für den Betreiber der

Anlage vom Gesamterlös abziehen; er zielt folglich auch auf den Gesamtterm ab. Um beiden Effekten gerecht zu werden, geht der Faktor S_E mit einem Wert von 0,75 in die Berechnungen ein. Für die weitere Diskussion stellt sich die ursprüngliche Formel 5-4 unter Beachtung der Formeln 5-10 und 5-11 nun wie folgt dar:

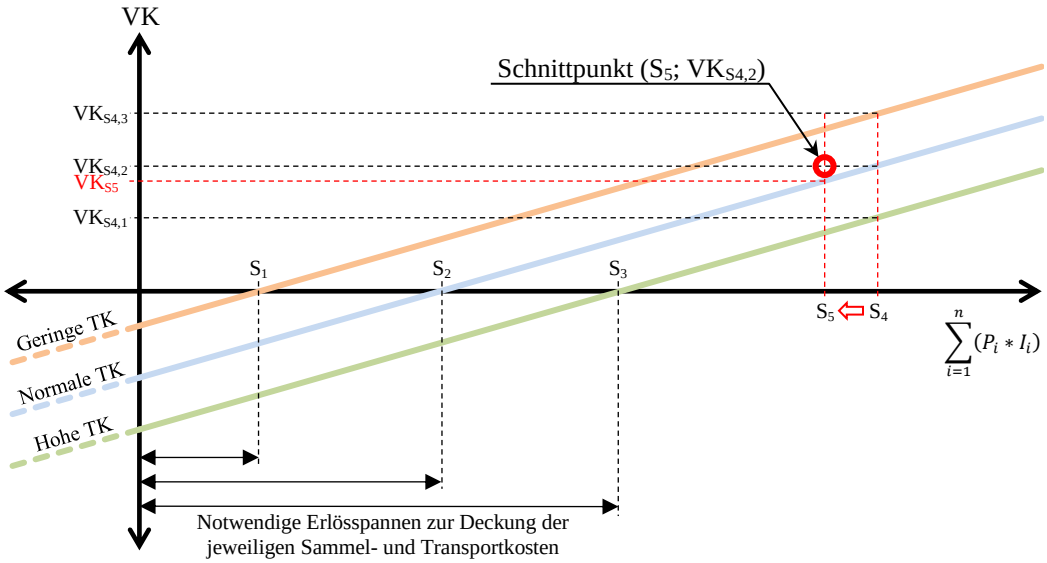
$$\sum_{i=1}^{n}(P_i * I_i) * x * S_E = VK(x) + TK(x) \qquad \textbf{Formel 5-12}$$

Die Formel 5-12 beschreibt in der gegebenen Form die jährlichen pagatorischen Gesamterlöse und -kosten in Euro je Jahr, die aus dem Betrieb einer Recyclingaktivität resultieren. Wird die Formel beidseitig durch die Bezugsmenge *x* in Tonnen je Jahr dividiert, zeigen beide Seiten die jeweiligen Stückpendants in Euro je Jahr und Tonne auf.

Anhand dieser Beziehung lassen sich nunmehr mittels des Konzeptes des Break-even einige fundamentale Wechselwirkungen beschreiben. Zentrale Annahme stellt die Parität der Kosten und Erlöse als vorgegebenes Minimalkriterium zur Initiierung einer Recyclingaktivität dar. Die Summe aller potenziellen Punkte, die eine Gleichheit der periodisierten pagatorischen Kosten und Erlöse ausdrücken, definiert eine stetige Gleichgewichtsfunktion. Obzwar diese bei einer vorerst theoretischen Betrachtung die Kombination aller Variablen der Formel 5-12, die zu einer Parität der Kosten und Erlöse führen, abdecken muss, sind hierfür die Restriktionen, die sich aus den einzelnen termspezifischen Kapiteln ergeben, weiterhin vollumfänglich zu beachten. Sonach ist zur Interpretation der Ergebnisse von essentiellem Charakter, dass sich beispielshalber die Verfahrenskosten auf eine Vollauslastung einer aktivitätsspezifischen oberen Kapazitätsgrenze beziehen und die Transportkosten nur gebietsspezifische Relevanzen aufweisen. Dies bedeutet in der Konsequenz, dass selbst die reine faktorbezogene Diskussion auf theoretischer Ebene nur innerhalb eines statischen Rahmens Geltung hat; alle Rahmenbedingungen bleiben unangetastet und für jedes Beispiel gleich, sofern nicht explizit anders angeführt. Gleichwohl werden die als Funktion dargestellten Kostenrubriken aufgrund der Notwendigkeit eines vordefinierten Rahmens durch die jeweiligen kapazitätsbedingten oder problemspezifischen Gesamtkosten substituiert. Zudem verzichtet die Betrachtung ob dieser gewollt faktorbezogenen Diskussion auf theoretischer Ebene auf explizite Wertangaben einzelner Terme. Vielmehr steht deren grundsätzliche Auswirkung auf den Break-even im Fokus, weshalb die Variation und die Angabe einzelner Terme abstrakt erfolgt.

Unter der Voraussetzung, dass innerhalb definierter regionaler Grenzen eine Recyclingaktivität mit einer festgelegten Kapazität von *x* Tonnen Altmodule je Jahr vollausgelastet betrieben wird, können sonach mittels der Formel 5-12 die Wechselwirkungen einzelner Parameter auf die Gewinnschwelle beschrieben werden:

- Mit zunehmenden Erlösen durch beispielshalber steigenden P_i können auch bei konstantem *x* höhere Kosten gedeckt werden. Dies kann sowohl höhere Verfahrenskosten (gestiegene Energiekosten) als auch höhere Sammel- und Transportkosten (gestiegene Treibstoffkosten) oder eine Kombination beider betreffen. Im Gegensatz dazu führt bei einer Parität der Kosten und Erlöse die Substitution von Ingredienzien durch monetär geringwertigere[165] zu einer damit verbundene Notwendigkeit der Kostensenkung. Diesen Zusammenhang soll Abbildung 5-33 exemplarisch verdeutlichen. Hierfür können zum einen die Verfahrenskosten (VK) sowie die Sammel- und Transportkosten (TK) getrennt, zum anderen gemeinsam als abhängige Variable dem Funktionsargument: „erzielbare Einzelerlöse“ zugeordnet werden. Je nach Zuordnung ergeben sich sonach lineare Funktionen mit dem Anstieg m aus dem Produkt von Bezugsmenge und Sicherheitsfaktor sowie dem fallabhängigen Absolutglied aus Verfahrenskosten oder Sammel- und Transportkosten. Bei der gemeinsamen Betrachtung beider Kostenrubriken als Funktionswert entfällt das Absolutglied entsprechend.



Legende:

Geradengleichungen der Form: $f(x) = m * x + n \rightarrow VK\left(\sum_{i=1}^{n}(P_i * I_i)\right) = x * S_E * \sum_{i=1}^{n}(P_i * I_i) - TK$

Abbildung 5-33: Graphische Darstellung der Verfahrenskosten als abhängige Variable vom Funktionsargument der erzielbaren Erlöse auf Basis der Gewinnschwellenermittlung.

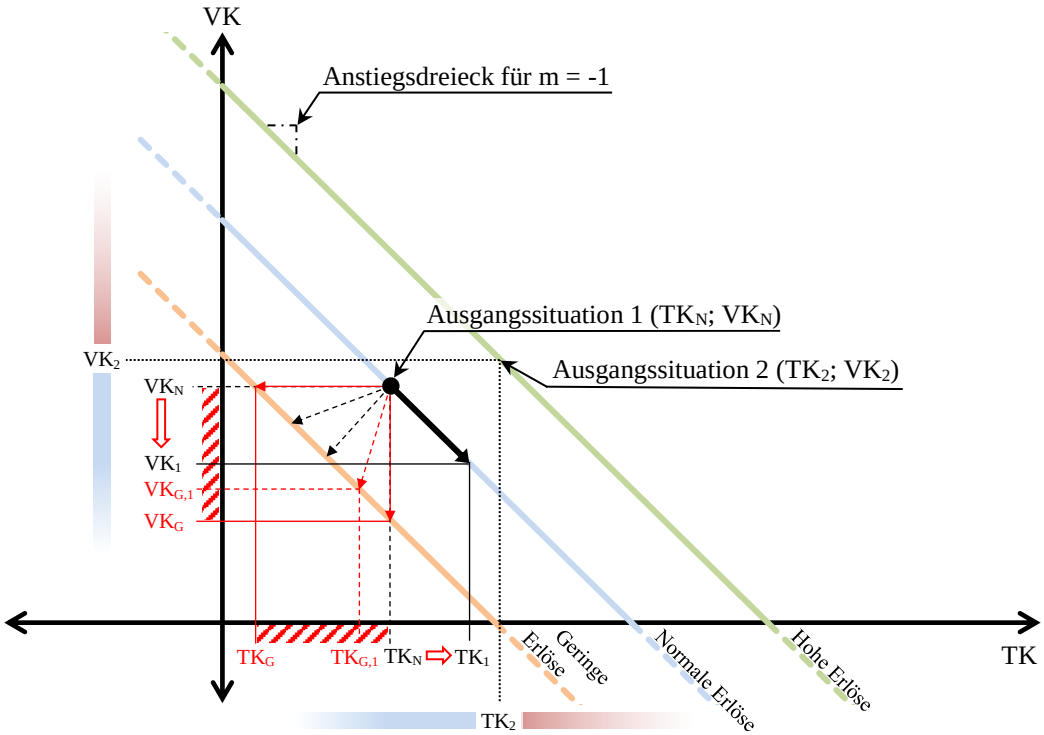
[165] Die potenzielle Substitution einzelner Ingredienzien ist Gegenstand des Kapitels 5.5.2.

Die Zunahme der potenziellen Gesamterlöse ist dabei auf eine Erhöhung der erzielbaren Preise von einzelnen oder mehreren Ingredienzien zurückzuführen; die Senkung der potenziellen Gesamterlöse indessen sowohl auf die Senkung von Preisen einzelner oder mehrerer Ingredienzien als auch auf die eben angedeutete Substitution einzelner Ingredienzien durch monetär minderwertige Pendants. Die in Abbildung 5-33 gezeigten Funktionsscharren ergeben sich ob der Variation des Absolutgliedes. Dargestellt ist die Abhängigkeit der erlaubten Verfahrenskosten vom erzielbaren Erlös. Das Absolutglied ist durch die Rubrik der Sammel- und Transportkosten definiert. Die Schnittpunkte (S_1 bis S_3) der jeweiligen Geraden mit der Abszissenachse beschreiben die notwendige Erlösspanne zur Deckung alleinig der zugehörigen Sammel- und Transportkosten. Infolge steigender Kosten der Beschaffungslogistik (olivgrüne Kennzeichnung) steigt die benötigte Erlösspanne zur Erreichung der Parität von S_2 auf S_3; sinkt diese Kostenrubrik (orange Kennzeichnung) verringert sich auch die benötigte Erlösspanne zur Deckung dieser Kosten auf S_1. Alle durch das Argument S_4 definierten Funktionswerte der jeweiligen Geraden ($VK_{S4,1}$ bis $VK_{S4,3}$) beschreiben die Grenzverfahrenskosten, die eine Recyclingaktivität bei einem gegebenen Erlös (Argument S_4) und in Abhängigkeit der Transportkosten (jeweilige Gerade) zur Erreichung der Gewinnspanne maximal aufweisen darf. Infolge der festgelegten Rahmenbedingungen kann dieser Wert mit dem real nach Formel 5-6 berechneten Wert für $VK(x)$ der identischen Bezugsmenge verglichen werden. Ist der berechnete Wert $VK(x)$ größer als die bestimmten Grenzverfahrenskosten, befindet sich die Aktivität in der Verlustzone; ist er kleiner übersteigen die Erlöse die Kosten. Aus der Differenz beider Werte lässt sich zudem der periodisierte Verlust respektive Gewinn direkt ermitteln. Eine Verringerung des Gesamterlöses von S_4 auf S_5 hat hingegen für die Gewinnschwelle zur Folge, dass:

- entweder bei konstanten Sammel- und Transportkosten die Verfahrenskosten beispielshalber entlang der blau gekennzeichneten Geraden auf den Funktionswert VK_{S5} gesenkt werden müssen,
- bei konstanten Verfahrenskosten (beispielshalber zu $VK_{S4,2}$) die Sammel- und Transportkosten auf ein Niveau zu reduzieren sind, welches die zugehörige Gerade durch Anpassung des Absolutgliedes parallel durch den Punkt (S_5; $VK_{S4,2}$) verschiebt, oder
- eine Kombination beider Anpassungsmaßnahmen erfolgt.

Gleiches gilt entsprechend umgekehrt für einen gesteigerten Erlös auf ein Argument größer als S_4. Werden indessen die Sammel- und Transportkosten in Abhängigkeit des erzielbaren Erlöses betrachtet, ergeben sich für jene Kostenrubrik analoge Schlussfolgerungen. Die abschließende Betrachtung der gemeinsamen Zuordnung der beiden Kostenrubriken zum Funktionsargument der erzielbaren Erlöse zeitigt letztlich eine Gerade, die durch den Koordinatenursprung verlaufen muss. Einzelne Funktionsargumente würden dann die Gesamtkosten definieren, die eine Recyclingaktivität maximal für die Erreichung des Break-even zu gegebenen Erlösstrukturen aufweisen darf.

- Werden dahingegen die beiden Kostenrubriken in eine mathematische Abhängigkeit gebracht, können gezielt die gegenseitigen Wechselwirkungen und deren Einfluss auf den Break-even untersucht werden. Hierfür ist es analog dem vorangegangenen Beispiel vordergründig irrelevant, ob die Verfahrenskosten oder die Sammel- und Transportkosten das Funktionsargument bilden. Im Sinne der angestrebten Diskussion wird in Abbildung 5-34 der Sachverhalt exemplarisch für die Sammel- und Transportkosten als Funktionsargumente und die Verfahrenskosten wiederum als abhängige Variable graphisch vorgegeben.



Legende:

Geradengleichungen der Form: $f(x) = m * x + n \rightarrow VK(TK) = -1 * TK + \left(x * S_E * \sum_{i=1}^{n}(P_i * I_i)\right)$

Abbildung 5-34: Graphische Darstellung der Verfahrenskosten als abhängige Variable vom Funktionsargument der Kostenrubrik Sammel- und Transportkosten auf Basis der Gewinnschwellenermittlung.

Ob der zu untersuchenden Beziehung, welche die vorgegebene mathematische Abhängigkeit bedingt, ergibt sich abermals eine lineare Funktionsgleichung. Der Anstieg folgt einem gleichschenkligen, rechtwinkligen Dreieck und ist negativ; er beträgt folglich den Wert „-1“. Der Grund liegt darin, dass sowohl auf theoretischer Ebene als auch realiter beide Achsen die jährlichen Gesamtkosten der jeweiligen Kostenrubrik in Geldeinheiten je Jahr ausgeben. Sonach kann zumindest rein gedanklich ein beliebieger Teil der einen Kostenrubrik durch einen gleichen Anteil der anderen Kostenrubrik substituiert werden. Das Absolutglied der linearen Funktion muss sich letztlich nach Formel 5-12 aus der gesamten Erlösseite ergeben. Wird diese variiert, ergeben sich per Definition Funktionsscharren. In der Abbildung 5-34 finden sich drei Fälle dargestellt: eine normale Erlösspanne (blaue Gerade), eine hohe Erlösspanne infolge eines gestiegenen Niveaus der Absatzpreise (grüne Gerade) und ein niedriges Erlösniveau (orange Gerade). Darüber hinaus wurden zwei Punkte markiert, die für die Diskussion die jeweilige Ausgangssituation darstellen. Diese beinhalten ein Erlösniveau, welches für den Break-even ein bestimmtes Verhältnis beider Kostenrubriken voraussetzt. Gehen beispielshalber unter normalen Erlösbedingungen die Sammel- und Transportkosten mit TK_N als Funktionsargument in die Betrachtung ein, ergeben sich durch den Schnittpunkt mit der zugehörigen Geraden die Verfahrenskosten zu VK_N. In einem ersten Schritt soll nun untersucht werden, welche Folgen aus einer Reduzierung der Gesamterlöse auf ein geringeres Niveau (orange Gerade) für die Gewinnschwelle resultieren. Damit eben jene Gewinnschwelle nicht unterschritten wird, müssten

- entweder die Verfahrenskosten auf den Wert VK_G,
- die Sammel- und Transportkosten auf TK_G, oder
- beide Kostenrubriken kombiniert gesenkt werden.

Neben den beiden Einzelmaßnahmen wurde in Abbildung 5-34 auch eine kombinierte Lösungsstrategie exemplarisch dargestellt, welche die Minderung der Kostenrubriken auf $VK_{G,1}$ und $TK_{G,1}$ fordert. Eine essentielle Erkenntnis ist, dass sich bei einer kombinierten Anpassung an ein gesunkenes Erlösniveau die Kostenrubriken maximal in den jeweiligen rot schraffierten Bereichen bewegen müssen. Diese Bereiche ergeben sich aus der Differenz der beiden Grenzwerte VK_N abzüglich VK_G sowie TK_N minus TK_G und können sich sonach in absolute Werte übersetzen lassen. In einem zweiten Schritt wird simuliert, dass sich bei der

Ausgangssituation 1 (TK_N; VK_N) und konstanter Erlösstruktur die Sammel- und Transportkosten beispielshalber aufgrund gestiegener Treibstoffkosten auf den Wert TK_1 erhöhen. Im Sinne der Parität der periodisierten pagatorischen Kosten und Erlöse müssten die Verfahrenskosten mindestens auf den Wert VK_1 gesenkt werden. Steigende Kosten der Beschaffungslogistik können sonach mit sinkenden Verfahrenskosten abgefedert oder kompensiert werden. Gleiches gilt konsequenter Weise analog im umgekehrten Fall. Die Ausgangssituation 2 mit Kosten, welche zur Wahrung der Parität eine Höhe von TK_2 und VK_2 betragen sollen, wurde rein aus Gründen der Darstellbarkeit auf eine hohe Erlössituation bezogen; die potenziellen Erkenntnisse gleichen denen eines „normalen“ Erlösniveaus. Beide Kostenwerte sind auf den zugehörigen Achsen in der Abbildung 5-34 jeweils mit einem blauen und einem roten Bereich gekennzeichnet. Die Diskussion zielt auf eine Art Sensitivitätsanalyse ab, weshalb sowohl die erzielbaren Erlöse als auch jeweils eine Kostenrubrik fix sind. Werden ausschließlich die Verfahrenskosten betrachtet, wird bei sonst konstanten Faktoren infolge einer Erhöhung auf Werte größer als VK_2 die Gewinnschwelle unterschritten: Verluste entstehen. Dies soll durch den roten, nach oben offenen Bereich signalisiert werden. Die Höhe des Verlustes lässt sich aus der Differenz des gestiegenen Wertes zum Grenzwert VK_2 berechnen. Darüber hinaus kann bei einer entgegengesetzten Betrachtungsweise auch die Höhe der benötigten Einsparung zur Erreichung der Parität von Kosten und Erlösen beziffert werden. Hierfür können real ermittelte, oder für die zugehörige vorgehaltene Kapazität nach Formel 5-6 berechnete Werte herangezogen und zu VK_2 ins Verhältnis gesetzt werden. Sind die realen oder berechneten Verfahrenskosten kleiner als VK_2 (blauer, nach unten offener Bereich), ergeben sich bei analoger Handhabe potenzielle Gewinne. Bei einer Fixierung der Verfahrenskosten gilt die gesamte Betrachtung zur zweiten Ausgangssituation für die Rubrik der Sammel- und Transportkosten gleichermaßen und vollumfänglich. Es lassen sich folglich auch desiderate Einsparungen bei den Kosten der Beschaffungslogistik zur Vermeidung von Verlusten identifizieren. Gleichwohl können bei einer faktorübergreifenden Betrachtung beider Kostenrubriken auch Wechselwirkungen analysiert werden, wobei sich etwaige Kostenüberschüsse einer Rubrik mit Potenzialen der anderen Kostenrubrik ausgleichen oder abmindern. Weiter lassen sich so auch Gesamtverluste oder –gewinne beziffern, sofern alle anderen Werte bekannt sind.

- In ähnlicher Weisen können auch alle anderen denkbaren Faktorkombinationen in Abhängigkeit gebracht, dargestellt und diskutiert werden. Hiervon wird jedoch abgesehen, da sich daraus keine zusätzlichen Erkenntnisse generieren lassen.

5.4.5.1 Statisches Modell

Nachstehend werden diese Erkenntnisse nun auf eine statische Problemstellung bezogen, wozu zuvörderst die notwendigen Rahmenbedingungen zu definieren sind. Nach der anschließenden Analyse der sich ergebenden Verhältnisse schließt sich zudem eine Variation einzelner Einflussfaktoren an. Die statischen Rahmenbedingungen orientieren sich an der im Kapitel 5.4.3.2 vorgegebenen Problemstellung. Untersuchungsgebiet ist sonach das ostdeutsche PV-Produktionscluster in der kurz- und mittelfristigen Planungsphase. Der annuell verfügbare Altmodulstrom bleibt entsprechend auf die Ausschüsse von Produzenten kristalliner Siliziumsolarmodule, die in den vorgegebenen regionalen Grenzen ansässigen sind (M1 bis M13 der Tabelle 4-33 auf Seite 317), beschränkt und beträgt 1.062,26 Tonnen. Initial wird ein optimaler Standort der Recyclinganlange angenommen. Dieser entspricht den Ergebnissen des Kapitels 5.4.3.2 nach dem Knoten R19. Die zugehörigen Verfahrenskosten werden mittels der Formel 5-6 berechnet und ergeben sich zu 413.897,69 € je Jahr.

Die definierte Situation findet sich in nachstehender Abbildung 5-35 für den Fall des Recyclings zur Verwertung graphisch aufbereitet. Die entsprechenden erzielbaren Einzelerlöse je Tonne $gSSM_{alt}$ betragen inklusive des Sicherheitsfaktors S_E 636,91 € (blaue Gerade). Des Weiteren wurde ein Fuhrpark mit ausschließlich 5,5 Tonnen Nutzlast zugrunde gelegt. Grund ist das geringe Aufkommen, welches bei einer Nutzlast von 28 Tonnen überbordend oft nicht ausgelastete Fahrten effizieren würde (keine FTL auf Basis von Direkttransporten möglich). Ein Transport mit ausschließlich 5,5 Tonnen Nutzlast würde circa 200 Fahrten im Jahr benötigen, um die gesamte Transportleistung zu gewährleisten. Überschlägig ergibt sich daraus eine Fahrtfrequenz von weniger als einer Fahrt je Arbeitstag. Die zugehörigen Sammel- und Transportkosten wurden für diese spezifischen Rahmenbedingungen und die jährliche Menge Altmodule in Höhe von 1.062,26 Tonnen entsprechend der Handhabe des Kapitels 5.4.3.2 neu berechnet und ergeben sich für den potenziellen Standort R19 zu 101.834,92 € je Jahr. Zusammen mit den Verfahrenskosten resultiert so die definierte Ausgangssituation, welche in der Abbildung 5-35 mit *P1* gekennzeichnet ist.

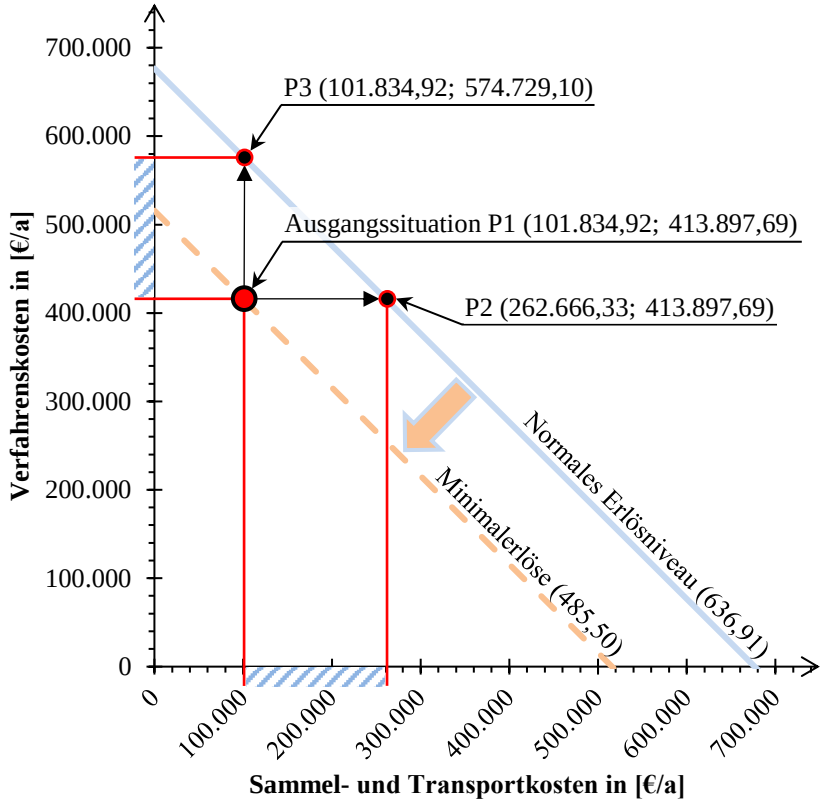


Abbildung 5-35: Darstellung der Gewinnschwelle für die statische Problemstellung mit Kennzeichnung der Ausgangslage und der Variation einzelner Parameter in Anlehnung an Abbildung 5-34.

Die Kombination aus Verfahrenskosten sowie Sammel- und Transportkosten soll nachstehend als Arbeitspunkt mit (TK(x); VK(x)) bezeichnet werden, welcher im Falle der Ausgangssituation bei (101.834,92 €; 413.897,69 €) liegt und sonach Gesamtkosten von 515.732,61 € je Jahr verursacht. Die Betrachtung der Ausgangssituation (Punkt P1) und der zugehörigen Erlösstruktur (blaue Gerade) macht deutlich, dass die annuellen Erlöse über den erforderlichen Kosten liegen. Aus den Schlussfolgerungen der vorangegangenen theoretischen Diskussion um die Abbildung 5-34 und infolge der Spezifik jener definierten Ausgangssituation ergeben sich unter Beachtung der pagatorischen Betrachtungsweise und der Annahme des stabilen laufenden Anlagenbetriebs die folgenden Konsequenzen und Möglichkeiten:

- Die Gewinnschwelle würde selbst bei einem reduzierten Erlösniveau auf 76,23 % der Ausgangssituation nicht unterschritten werden. Diese Erlössituation ist mittels der orange gestrichelten Geraden gekennzeichnet, welche per Definition durch den Arbeitspunkt *P1* verlaufen muss. Daraus ergibt sich ein zu erzielender Einzelerlös von mindestens 485,50 € je Tonne recycelter $gSSM_{alt}$. Wenngleich von einer Senkung der potenziellen Einzelerlöse aufgrund anstehender Materialsubstitutionen (vgl. Kapitel 5.5.2) tatsächlich auszugehen ist, erscheint diese Dimension

als unwahrscheinlich. Selbst bei einer totalen Substitution des Silberanteils in einem $gSSM_{sc/mc}$ und bei Nichtbeachtung des monetären Wertes des Ersatzstoffes würde sich ein potenziell erzielbarer Einzelerlös aus dem Recycling zur Verwertung von 698,14 € je Tonne Altmodule ergeben, gemindert um den Sicherheitsfaktor S_E sogar immer noch 523,60 €/t. Dieser Wert liegt deutlich über dem desideraten Minimalwert des Arbeitspunktes *P1*.

- Die Gesamtkosten der Beschaffungslogistik könnten bei sonst konstanten Verfahrenskosten und normalen Erlösniveau von 101.834,92 € je Jahr auf 262.666,33 € je Jahr ansteigen. Dies entspricht einem Faktor von 2,58. Jener Grenzwert beschreibt den in der Abbildung 5-35 gekennzeichneten Arbeitspunkt *P2*. Besitzen die Verfahrenskosten indessen zusätzlich ein Minderungspotenzial, würde dies die Maximalkosten für Sammlung und Transport um den entsprechenden Betrag weiter erhöhen. Dies soll jedoch ob der Betrachtung oberer Schranken und desiderater Extremwerte keine weitere Beachtung finden.
- Bei Konstanz der Rubrik der Sammel- und Transportkosten ergibt sich analog des direkt vorangegangenen Stichpunktes ein Maximalwert für die Verfahrenskosten von 574.729,10 € im Jahr, was einer Erhöhung von 160.831,41 € im Jahr gleichkommt. Der zugehörige potenzielle Arbeitspunkt geht mit der Bezeichnung *P3* in die Abbildung 5-35 ein.
- Diese beiden Grenzpunkte definieren auf der jeweils zugehörigen Achse den Abschnitt (blau schraffierte Fläche), der bei einer Erhöhung einer der beiden Kostenrubriken weiterhin eine Überschreitung der Gewinnschwelle zeitigt; also den Bereich, den die beiden Kostenrubriken einzeln zur Gewinnerzielung annehmen dürften.
- Bei einer kombinierten Steigerung beider Kostenrubriken muss sich der resultierende Arbeitspunkt zur Vermeidung von Verlusten im zulässigen Raum befinden, welcher durch das, aus der Ausgangssituation *P1* sowie den beiden Grenzpunkten *P2* und *P3*, definierte Dreieck begrenzt wird. Die Summe der kombinierten Kostenerhöhungen darf allerdings einen Betrag von jährlich 160.831,41 € nicht übersteigen. Dieser Wert entspricht genau der Ausprägung der blau schraffierten Bereiche beider Achsen.

- Der jährliche pagatorische Gewinn des laufenden Betriebs (ohne Beachtung der Investitionskosten) wäre sonach im Falle der Ausgangssituation (Arbeitspunkt *P1*) mit eben jenen 160.831,41 € zu erwarten. Dieser würde um die entsprechenden potenziellen Kostenerhöhungen beider Rubriken einzeln oder im Falle einer gemeinsamen Erhöhung um deren Summe reduziert werden. Analog umgekehrt würden sich Kostenreduktionen auf den zu erwartenden Gewinn auswirken.

Wie bereits ausführlich begründet, gelten diese Werte nur für die definierten statischen Rahmenbedingungen. Dies begreift jedoch nicht einzelne, von der Bezugsmenge losgelöste Faktoren vollumfänglich mit ein. Eine Erhöhung der Kosten kann neben spezifischen Gründen wie beispielshalber gestiegenen Spritpreisen oder wachsenden Energie- und Personalkosten vor allem auf Teilbereiche der Sammel- und Transportkosten zutreffen, die eine mengenunabhängige Modifikation innerhalb der Rahmenbedingungen darstellen – genauer die Standortwahl oder die mittlere Frachtrate (bei Auslagerung) und deren Auswirkung auf die Gesamtkosten jener Rubrik.

Wird im Gegensatz zur optimalen Standortwahl ein ungünstiger Knoten ausgewählt, sollten sich die resultierenden Gesamtkosten für die Beschaffungslogistik zur Wahrung der Rentabilität weiterhin im blau schraffierten Bereich der Abbildung 5-35 zwischen 101.834,92 € je Jahr und 262.666,33 € je Jahr bewegen. Wird exemplarisch der Knoten R21 gewählt, ergeben sich die annuellen Sammel- und Transportkosten unter sonst gleichen Bedingungen zu 158.395,60 €; der zugehörige Arbeitspunkt würde sich innerhalb des zulässigen Bereiches der Gewinnerwirtschaftung befinden. Wird der laut der Standortoptimierung nach Abbildung 5-31 schlechteste Fall zugrunde gelegt, was mit einem Betrieb der Recyclingaktivität im Knoten R13 einherginge, lägen die Kosten indessen außerhalb des notwendigen Bereiches bei 270.256,80 € je Jahr. Zu Erreichung des Break-even wäre folglich:

- entweder eine Senkung der Sammel- und Transportkosten um 7.590,47 € je Jahr,
- eine Senkung der Verfahrenskosten um den gleichen Betrag,
- eine Kombination beider Maßnahme um jene Summe oder
- eine Erhöhung des Erlösniveaus notwendig.

Erhöht sich zudem die mittlere Frachtrate auf den Wert 2,50 € (vgl. hierzu Kapitel 5.4.3.2) würde sich die Situation im Falle der Standortwahl im Knoten R13 zusätzlich verschärfen, wobei das Defizit dann bereits 44.443,67 € (Ergebnis der Differenz aus 307.110,00 und 262.666,33 €/a) beträgt.

5.4.5.2 Dynamisches Modell

Wie aber verhält sich das System bei Abweichungen, die entweder direkt oder indirekt durch eine Veränderung der Bezugsmenge induziert werden? Liese sich das System auch dynamisch in Abhängigkeit der Bezugsmenge und damit der Zeit betrachten? Um die Abhängigkeit der Gewinnschwelle von der Bezugsmenge *x* zu diskutieren, müssen die mengengebundenen Beziehungen innerhalb der einzelnen Terme der Formel 5-12 bekannt sein. Gleichwohl lässt sich bereits aus den Diskussionen der jeweils zu den Termen zugehörigen Kapitel 5.4.2 bis 5.4.4 festhalten, dass es sich dabei realiter nicht um stetige, sondern um diskrete Ausprägungen handelt. Das wird besonders bei den kapazitätsgebundenen Verfahrenskosten deutlich, die eine interne Skalierung der Kosten verbieten. Ähnlich der Rubrik der Sammel- und Transportkosten sind die Gesamtkosten jeweils nur für definierte und vor allem statische Verhältnisse bestimmbar. Dieserhalb lässt sich letztlich auch kein durchweg dynamisches Modell herleiten respektive beschreiben; vielmehr entsteht eine quasidynamische weil sprungstatische Ergebnismenge. Obzwar hierdurch die Bildung einer stetigen Funktion, welche die Abhängigkeit des Break-even von der Bezugsmenge *x* ausgeben kann, unzulässig ist, stellt genau dies aus Gründen der Vereinfachung und besonders im Sinne der graphischen Aufarbeitung das Ziel dieses Kapitels dar. Aus dieser stetigen Betrachtungsweise können im Umkehrschluss wiederum diskrete Ergebnisse hervorgehen. Wenngleich diese nicht uneingeschränkte Geltung besitzen, lassen sich daraus jedoch Rahmenbedingungen für eine fixe Bezugsmenge ableiten und diskutieren. Die Exigenz der Generierung von Funktionswerten, welche mindestens diskrete Ausprägungen beschreiben können, ist sowohl für die Erlösseite der Formel 5-12 als auch für die Rubrik der Verfahrenskosten (mit Formel 5-6) gegeben. Eine allgemeine Skalierbarkeit der Rubrik der Sammel- und Transportkosten ist derzeit nicht bekannt.

Allerdings lassen sich aus den ermittelten Abhängigkeiten der Erlösseite und der Verfahrenskosten von der Bezugsmenge Schlussfolgerungen über mengenabhängige Maximalkosten der Beschaffungslogistik generieren, welche per Definition die allgemeinen Grenzkosten der Rubrik der Sammel- und Transportkosten je Altmodulmenge, losgelöst von den rubrikspezifischen Einschränkungen und Restriktionen, zur Überschreitung der Gewinnschwelle darstellen. Es ist folglich auf Basis der Formel 5-12 der Term der Sammel- und Transportkosten als unbekannter Funktionswert zu definieren und von der Bezugsgröße *x* als Funktionsargument abhängig zu machen. Wichtig ist dabei

nochmals zu erwähnen, dass die Form *TK(x)* in diesem Zusammenhang nicht die rubrikinterne Mengenabhängigkeit adressiert, sondern die Maximalkosten dieser Rubrik im Sinne des Break-even. Um eine verwechslungsfreie Diskussion zu begünstigen, werden die Funktionswerte dieser Abhängigkeit nachfolgend mit TK_M gekennzeichnet. Alle anderen bekannten mengenabhängigen Beziehungen sind für die entsprechenden Terme einzusetzen. Die resultierende Gleichung ist anschließend nach TK_M umzustellen. Die maximalen Sammel- und Transportkosten in Euro je Jahr zur Erreichung der Gewinnschwelle in Abhängigkeit der Bezugsmenge *x* ergeben sich für das Recycling$_{VR}$ sonach zu:

$$TK_M(x_{VR}) = \sum_{i=1}^{n}\left(P_{i,VR} * I_{i,VR}\right) * x_{VR} * S_E - VK(x_{VR}) \qquad \textbf{Formel 5-13}$$

$$= 636{,}91 * x_{VR} - 817.511{,}75 * e^{\left(\frac{-977{,}9256}{x_{VR}+374{,}5}\right)}$$

In nachstehender Abbildung 5-36 ist diese Beziehung graphisch aufbereitet, wobei gezielt der Bereich der Nullstelle zusätzlich hervorgehoben wurde. Dieser Wert gibt die Mindestmenge an gSSM$_{alt}$ in Tonnen je Jahr aus, die alleinig zur Deckung der Verfahrenskosten notwendig ist, wobei für das Recycling$_{VR}$ gilt: $x_{VR} = x$.

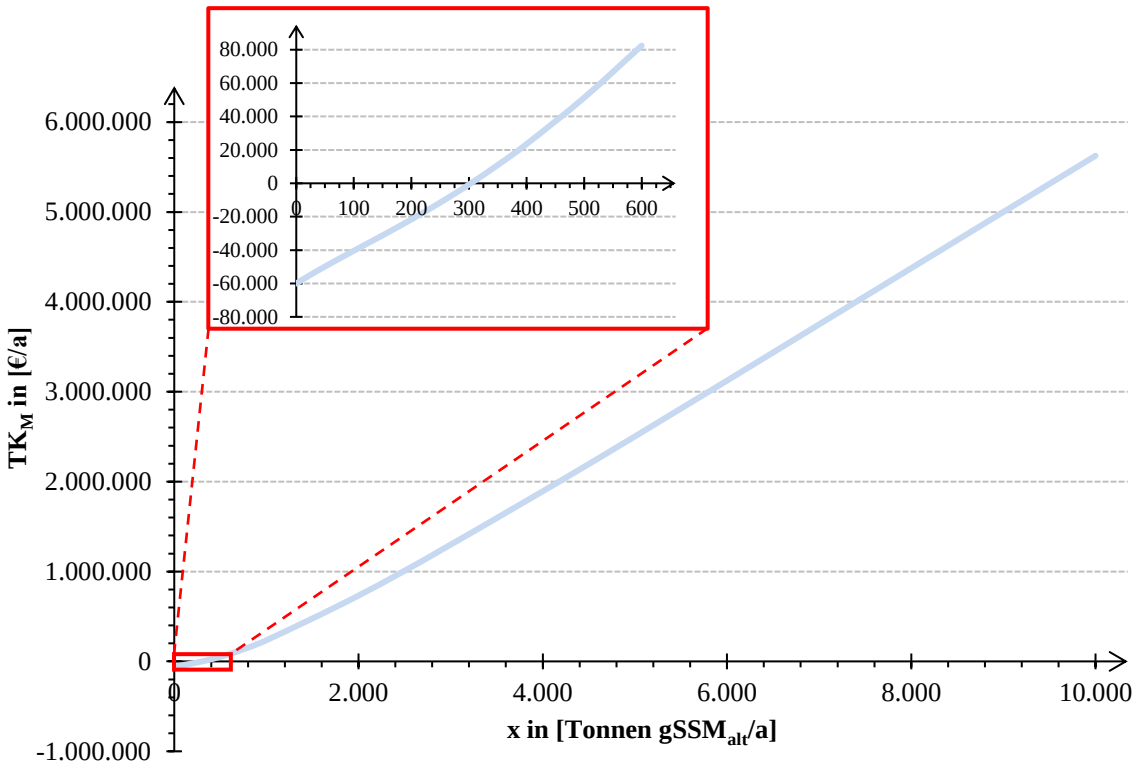


Abbildung 5-36: Maximale allgemeine Transportkosten in Abhängigkeit der annuellen Bezugsmenge kristalliner Siliziumsolaraltmodule zur Erreichung des Break-even nach Formel 5-13.

Auf rein gedanklicher Ebene wäre demnach eine auszulastende Anlagenkapazität eines $Recycling_{VR}$ alleinig zur Deckung der Verfahrenskosten von rund 303,194 Tonnen $gSSM_{alt}$ je Jahr notwendig. Bei der Auslastung höherer anlagenspezifischer Kapazitäten dürfen die zum entsprechenden *x* zugehörigen TK_M der Abbildung 5-36 oder nach Formel 5-13 nicht überschritten werden. Beispielshalber darf die Beschaffung der kristallinen Altmodule zur Auslastung einer Analagenkapazität von 5.000 Tonnen je Jahr nicht Kosten über 2.503.041,51 € je Jahr verursachen, da sonst mit aktivitätsspezifischen Verlusten zu rechnen ist. Diese würden sich direkt aus der Differenz der tatsächlichen Sammel- und Transportkosten und der TK_M ergeben. Für Anlagenkapazitäten unterhalb der desideraten Menge zur Deckung der Verfahrenskosten geht bei sonst gleichen Strukturen ein Defizit hervor, wobei die eigentlichen Sammel- und Transportkosten noch zusätzlich auszugleichen wären. Angewandt auf das Beispiel eines $Recycling_{VR}$, welches alleinig die Produktionsausschüsse im ostdeutschen Produktionscluster als Prozessinput nutzt, ergeben sich zur Bereitstellung von jährlich 1.062,26 Tonnen $gSSM_{alt}$ maximale Sammel- und Transportkosten in Höhe von 262.666,33 € je Jahr. Dieser Wert entspricht genau den im vorangegangenen Kapitel ermittelten Maximalkosten dieser Rubrik im statischen Fall.

Aus dieser Beziehung lässt sich jedoch keine Skalierbarkeit der Sammel- und Transportkosten im eigentlichen Sinne ableiten. Dies scheint auch den bisherigen Ausführungen folgend ob der Vielzahl von Parametern, die die potenziellen Kosten der Beschaffungslogistik beeinflussen, realiter nicht möglich – selbst für den diskreten Fall. Unter festen Rahmenbedingungen, welche die regionalen Grenzen des Bezugssystems, die Anzahl und Verteilung der relevanten Knoten, die Standortwahl sowie die Auslegung des Fuhrparkes einbegreifen, lässt sich allerdings eine Näherungslösung realisieren. Mit deren Hilfe und infolge der Fixierung des betrachteten Systems kann die Rubrik der Sammel- und Transportkosten in Abhängigkeit der Bezugsmenge skaliert werden, wenngleich auch nur stark abstrahiert und modellgebunden.

Zur Generierung dieser Beziehung und der zugehörigen Näherungslösung bleibt die Betrachtung weiterhin an die bereits ausführlich definierten regionalen Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters gebunden. Die bisher für dieses Bezugssystem kalkulierten Lösungen sollen als Grundlage zur Berechnung weiterer Werte dienen, welche sich aus einer gezielten Anpassung der gebietsspezifischen Mengen ergeben. Diese gebietsspezifischen Mengen werden nicht willkürlich festgelegt, sie orientieren

sich an den in der Tabelle 5-21 (Kapitel 5.4.4.3, Seite 561) ermittelten markanten K_{rf}-Werten. Dies begreift neben dem kurzfristigem K_{rf}-Wert auch den des offenen Geltungsbereiches sowie den $K_{rf,m}$-Wert des geschlossenen Geltungsbereiches ein, da diese für jede Region individuelle Ausprägungen aufweisen. Allerdings ergeben sich für steigende Mengen regionalspezifisch anfallender Altmodulmengen auch abweichende Anforderungen an die Beschaffungslogistik. Zudem unterscheiden sich die Bezugsquellen qualitativ und quantitativ sowohl im geschlossenen und im offenen Geltungsbereich als auch in der kurz- und mittelfristigen Planungsphase selbst vom ausschließlichen Bezug der Produktionsausschüsse der Produzenten an den Standorten M1 bis M13.

Zur Generierung von Wertepaaren aus der Bezugsmenge x und den resultierenden Sammel- und Transportkosten stellen die Ausführungen des Kapitels 5.4.3.2 die Diskussionsgrundlage. Gleichwohl gelten folgende weitere Einschränkungen:

- Es handelt sich vorerst ausschließlich um ein $\text{Recycling}_{\text{VR}}$. Entsprechend der Formel 5-10 sind keine generellen Inputbeschränkungen zu beachten.
- Wenn nicht explizit anders erwähnt, wird der im Kapitel 5.4.3.2 ermittelte optimale Standort R19 als Betriebsstätte der Recyclingaktivität zugrunde gelegt.
- Die definierte Region des ostdeutschen PV-Produktionsclusters begrenzt unverändert den betrachtungsrelevanten Raum, unabhängig der Quantität und Qualität der einzelnen Bezugsquellen (Knoten).
- Die Berechnung von Sammel- und Transportwerten orientiert sich in jedem Fall am Kapitel 5.4.3.2. Grundlage bilden die Transportleistungen in Tonnenkilometern, welche auf einer Entfernungsmatrix und dem entsprechenden Bezugswert x basieren. Die Knotenmenge r bleibt in der geographischen Lokalisierung der Knoten konstant, kann bei Bedarf aber in den Einzelbeiträgen angepasst werden. Gleichwohl können gegebenenfalls weitere Bezugsquellen hinzukommen.
- Die mittlere Frachtrate beträgt bei Auslagerung der Transporttätigkeit 2,20 € je Fahrzeugkilometer unabhängig der Auslegung des Fuhrparks.

Als erstes Wertepaar W_1 werden die Sammel- und Transportkosten in der kurz- und mittelfristigen Planungsphase im Falle eines $\text{Recycling}_{\text{VR}}$ der Produktionsausschüsse, welche im ostdeutschen PV-Produktionscluster anfallen, für den Transport mit 5,5 Tonnen Nutzlast (aus den bereits benannten Gründen) in Höhe von 101.834,92 € je Jahr der entsprechenden annuellen Transportmenge von 1.062,26 t/a zugeordnet.

Das zweite Wertepaar soll, wie bereits erwähnt, die für das Recycling_{VR} annuell verfügbare Altmodulmenge des kurzfristigen K_{rf}-Wertes in Höhe von 1.450 Tonnen den Sammel- und Transportkosten gegenüberstellen. Hierfür sind jedoch ein paar Anpassungen des betrachteten Systems notwendig. Zum einen liegen dem K_{rf}-Wert nicht ausschließlich Produktionsausschüsse zugrunde. Er umfasst alle Formen von in der fixierten Region annuell verfügbaren gSSM_{alt}, welche in das Prognosemodell nach Kapitel 5.2 einfließen. Dies gilt analog für die nachstehende Ermittlung der weiteren Wertepaare. Wenngleich der Teil der Altmodule, die keine Produktionsausschüsse darstellen, für den kurzfristigen K_{rf}-Wert quantitativ noch eine untergeordnete Rolle spielen, erhöht sich deren prozentualer Anteil am Gesamtaltmodulstrom vor allem in der langfristigen Planungsphase auf prozentuale Anteile von weit über 90 %. Es ist davon auszugehen, dass diese vordergründig an den Übergabestellen der örE ins System eingehen; dort durch den Recycler abzuholen sind. Die Knotenmenge *r* alleine wird diesen Anforderungen jedoch nicht gerecht. Dieserhalb wird einerseits die Knotenmenge um potenzielle Knoten innerhalb der regionalen Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters erweitert und andererseits den bestehenden Knoten das Attribut einer Übergabestelle zusätzlich zugeschrieben. In den Knoten R1 bis R13 fallen demnach nicht nur Produktionsausschüsse an, sondern anteilig auch Altmodule am Ende der Nutzungsphase, aus Retouren, aus Rückrufaktionen der Hersteller, aus Garantiefällen et cetera. Der Erweiterung der Knotenmenge liegen folgende Prämissen zugrunde:

- Die Abdeckung des in der Tabelle 5-7 (Kapitel 5.2.2.4, Seite 446) definierten ostdeutschen PV-Produktionsclusters soll sowohl in den Randbereichen als auch in den Zwischenräumen verbessert werden.
- Innerhalb dieser regionalen Grenzen wurde jeder Stadt mit mehr als 50.000 Einwohnern, die kein Element der Knotenmenge *r* ist, ein Knoten zugeteilt; nicht jedoch Gera (wird durch die Knoten R8 und R9 bereits abgedeckt) und Leipzig (wird R14 zugeordnet) sowie Brandenburg an der Havel, Magdeburg und Dessau-Roßlau, welche außerhalb der Systemgrenzen liegen.
- Der prognostizierte Gesamtaltmodulstrom, abzüglich der bereits zugeordneten Produktionsausschüsse, wird auf alle Knoten gleichverteilt.
- Der Standort der Recyclingaktivität R19 stellt bei der Betrachtung keine Ausnahme dar. Er fungiert zugleich als Standort der Recyclingaktivität und als Übergabestelle.

Die grundlegende Entfernungsmatrix wird sonach um die neun Knoten Halle (Saale), Grimma, Altenburg, Jena, Zwickau, Cottbus, Potsdam, Plauen und Görlitz erweitert. Wenngleich die Wahl der Übergabestellen willkürlich erscheint und aufgrund der geringen Anzahl ein Fehlerpotenzial generiert, kann die dadurch erzeugte Abweichung zur Realität vernachlässigt werden. Die reale Zahl an Übergabestellen ist aufgrund der gewollten Abdeckung der betrachteten Region und der angenommenen Gleichverteilung des prognostizierten Gesamtaufkommens (ohne den Anteil des ortsfesten Produktionsausschusses) irrelevant, da eine weitere Erhöhung der Knotenanzahl zwar die Gesamtdistanzen erhöhen würde, gleichzeitig jedoch zu einer Reduktion der Altmodulmengen je Knoten führt. Zudem kann infolge der regionalen Abdeckung angenommen werden, dass sich weitere Knoten in den Entfernungen nur geringfügig von den existierenden unterscheiden, beziehungsweise in einer Grenzwertbetrachtung gleichen. Demnach bliebe die benötigte Transportleistung unverändert. Infolgedessen kann, wenngleich auch nur auf theoretischer Ebene, diese geringe Anzahl an Knoten der weiteren Betrachtung zugrunde gelegt werden, ohne dass das Endergebnis bei einer entsprechend höheren Anzahl an Knoten stark abweichen würde. Die gesamte Knotenmenge aller Altmodulquellen ergibt sich sonach aus der Knotenmenge *r* plus der neun benannten Knoten zur nachstehend mit Knotenmenge *b* (steht für Bezug) bezeichneten Gesamtheit. Im Anhang 5-7 findet sich die zugehörige Entfernungsmatrix hinterlegt. Die entsprechende Mengenverteilung ergibt sich aus den zu betrachtenden K_{rf}- und $K_{rf,m}$-Werten abzüglich der Produktionsausschüsse in den Knoten R1 bis R13 und der anschließenden Division durch die Anzahl der Knoten der Knotenmenge *b* (entspricht 30 Knoten).

Im Falle des kurzfristigen K_{rf}-Wertes, der ein Gesamtaltmodulaufkommen von jährlich 1.450 Tonnen vorgibt, entfallen so zusätzliche 12,9247 Tonnen (1.450 abzüglich 1.062,26 dividiert durch 30) auf jeden Knoten. Zusätzlich deshalb, da dieser Massenstrom für die Standorte der Modulproduzenten zu den standortspezifischen Produktionsausschüssen hinzuzurechnen ist. Bei allen anderen Knoten stellt dieser Massenstrom die Grundmenge. Der Transport der Altmodule zum Recycler bleibt wie beim Beispiel des Wertepaares W_1 ausschließlich Fahrzeugen mit einer Nutzlast von 5,5 Tonnen vorbehalten. Dies begründet sich zum einen im nur geringfügig gestiegenen Gesamtmassenstrom, welcher in toto knapp 280 Fahrten je Jahr voraussetzt. Zum anderen ist aufgrund der geringen Einzelbeiträge von Knoten, die nicht zugleich einen Produzentenstandort darstellen, mit einem jährlichen Beitrag von 12,9247 Tonnen $gSSM_{alt}$ keine sinnvolle Auslastung von

Fahrzeugen mit 28 Tonnen zulässiger Nutzlast möglich. Die resultierende Sammel- und Transportkosten für das $Recycling_{VR}$ von 1.450 Tonnen kristalliner Siliziumsolaraltmodule unter den benannten Bedingungen im Standort R19 (vgl. Abbildung 5-28, Seite 541) betragen 146.875,08 € je Jahr. Der im Sinne dieser Betrachtung fixierte Standort einer potenziellen Recyclingaktivität im Knoten R19 gibt auch für diese Kalkulation der Sammel- und Transportkosten den Minimalwert aus. Weitere gute Ergebnisse erzielen die potenziellen Standorte R11 mit 152.483,76 €/a, R1 (158.245,56 €/a), R5 (165.113,52 €/a) und R7 (168.752,76 €/a). Die höchsten rubrikinternen Kosten würde wiederum eine Recyclingaktivität im Knoten R13 mit 378.077,04 € je Jahr verursachen.

Für den K_{rf}-Wert im offenen Geltungsbereich, welcher durch eine regionalspezifische Gesamtmenge jährlich verfügbarer kristalliner Siliziumsolaraltmodule in Höhe von 5.100 Tonnen gekennzeichnet ist, kann indessen die Nutzung von Fahrzeugen mit einer zulässigen Nutzlast von 28 Tonnen zielführend sein. Liegt beiden Varianten (Fuhrpark mit 28 Tonnen und 5,5 Tonnen Nutzlast) die gleiche Frachtrate zugrunde, können infolge der höheren knotenspezifischen Einzelbeiträge Kosten ob der Reduzierung der Anzahl benötigter Einzelfahrten eingespart werden – zumindest in der vereinfachten modellgebunden Betrachtungsweise. Die Verteilung der Gesamtmenge des annuellen Altmodulaufkommens schreibt jedem Knoten der Knotenmenge *b* 134,59 Tonnen $gSSM_{alt}$ je Jahr zu; im Falle der Produzentenstandorte zusätzlich zum Produktionsausschuss. Dies würde bei einer vorgeschriebenen Nutzlast der Transportfahrzeuge von 5,5, Tonnen insgesamt rund 920 Einzelfahrten bedingen, für 28 Tonnen Nutzlast 187 Einzelfahrten. Die resultierenden Kosten dieser Kostenrubrik betragen für den Standort R19 521.601,08 € je Jahr im Falle des Transportes mit 5,5 Tonnen Nutzlast und 106.326,00 € je Jahr für die Variante mit 28 Tonnen.

Im Falle des $K_{rf,m}$-Wertes des geschlossenen Geltungsbereiches in Höhe von 12.500 Tonne je Jahr ergeben sich annuelle knotenspezifische Einzelbeiträge mit 381,258 Tonnen zuzüglich etwaiger Produktionsausschüsse. Zum Transport mittels Fahrzeugen einer zulässigen Nutzlast von 5,5 Tonnen wären jährlich in Summe 2.222 Fahrten, bei 28 Tonnen Nutzlast 446 notwendig. Die zugehörigen Gesamtkosten betragen 1.284.154,52 € je Jahr im Falle von 5,5 Tonnen Nutzlast, respektive 258.322,68 € je Jahr bei 28 Tonnen Nutzlast je Fahrzeug. Alle aufgeführten Wertepaare finden sich in nachstehender Tabelle 5-23 nochmals übersichtlich zusammengefasst.

Tabelle 5-23: Sammel- und Transportkosten in € je Jahr für jeden potenziellen Recyclingstandort in Abhängigkeit der annuellen Bezugsmenge und der Auslegung des Fuhrparks.

		Produktions-ausschüsse		**Kurzfristiger K_{rf}-Wert**		**K_{rf}-Wert offener Geltungsbereich**		**$K_{rf,m}$-Wert geschlossener Geltungsbereich**	
		1.062,26 [t/a]		**1.450 [t/a]**		**5.100 [t/a]**		**12.500 [t/a]**	
	Nutzlast	**28 Tonnen**	**5,5 Tonnen**	**28 Tonnen**	**5,5 Tonnen**	**28 Tonnen**	**5,5 Tonnen**	**28 Tonnen**	**5,5 Tonnen**
Potenzieller Recyclingstandort	**R1**	25.704,36	111.541,32	37.686,44	158.245,56	110.496,76	543.198,04	266.562,56	1.325.683,04
	R2	45.295,80	197.749,20	63.628,84	271.582,52	177.577,40	870.520,20	418.985,16	2.086.253,40
	R3	42.702,00	186.234,40	58.548,16	252.006,48	159.623,20	783.921,60	374.053,24	1.863.943,40
	R4	40.599,68	178.054,80	59.549,60	251.882,40	172.177,28	847.268,40	414.066,40	2.063.605,28
	R5	26.324,32	113.512,08	39.474,60	165.113,52	120.362,88	591.327,00	293.516,96	1.460.140,44
	R6	31.656,24	138.595,16	46.112,00	194.040,44	132.449,68	651.448,60	318.056,20	1.581.280,80
	R7	27.514,52	119.451,20	40.047,04	168.752,76	116.756,64	573.787,72	280.851,56	1.396.948,52
	R8	31.840,60	139.516,96	45.634,16	194.498,04	131.206,24	646.080,60	314.992,04	1.568.236,56
	R9	32.953,80	144.790,80	46.841,08	200.282,72	133.024,76	655.183,76	318.199,64	1.584.309,76
	R10	34.084,60	150.313,24	48.510,44	206.411,92	136.092,00	667.897,12	322.761,56	1.605.090,52
	R11	23.872,64	101.171,84	37.085,40	152.483,76	117.649,84	576.968,48	289.814,36	1.440.877,68
	R12	43.654,16	191.304,08	63.965,44	270.336,88	184.246,48	906.989,60	442.911,92	2.207.880,40
	R13	62.590,00	270.256,80	89.672,88	378.077,04	252.938,40	1.243.668,80	602.266,72	3.002.740,40
	R14	31.970,40	138.978,40	43.603,56	187.949,08	120.804,20	593.025,40	284.902,64	1.418.120,00
	R15	32.328,12	141.461,32	43.071,16	187.198,00	115.673,80	566.719,12	268.952,64	1.338.067,72
	R16	40.369,12	176.938,08	53.595,52	233.179,76	141.670,32	694.911,36	327.948,72	1.632.890,16
	R17	40.007,00	174.543,60	54.796,72	235.818,00	149.491,76	733.523,12	350.090,40	1.743.837,92
	R18	54.118,24	234.718,88	75.994,16	323.384,16	211.193,84	1.037.746,16	499.349,84	2.488.984,96
	R19	23.776,28	101.834,92	35.125,20	146.875,08	106.326,00	521.601,08	258.322,68	1.284.154,52
	R20	35.406,36	154.685,96	49.324,88	211.149,40	137.309,92	673.617,56	323.963,64	1.612.245,36
	R21	36.361,60	158.395,60	48.942,96	211.918,08	132.994,40	652.735,60	311.399,44	1.550.428,00
		Angaben in €/a							

Die orange hinterlegten Zeilen kennzeichnen die jeweils resultierenden minimalen Kosten für Sammlung und Transport im Falle des optimalen Standortes der Recyclingaktivität im Knoten R19; die olivgrün hinterlegten Zeilen die schlechteste weil kostenintensivste Alternative im Falle des Knotens R13. Wird die Nutzlast der Transportfahrzeuge mit 5,5 Tonnen festgelegt, lässt sich für den optimalen Standort der Recyclingaktivität aus den einzelnen Wertepaaren W_1 (1.062,26 t/a; 101.834,92 €/a), W_2 (1.450 t/a; 146.875,08 €/a), W_3 (5.100 t/a; 521.601,08 €/a) und W_4 (12.500 t/a; 1.284.154,52 €/a) eine mathematische Beziehung ableiten, welche zusätzlich durch das Wertepaar W_0 mit 0 t/a und 0,00 €/a definiert sein muss. Dies gilt analog für den Fall eines Fuhrparks mit Fahrzeugen einer ausschließlichen Nutzlast von 28 Tonnen. Beide Funktionen geben jedoch nur gebietsspezifische Sammel- und Transportkosten in

Abhängigkeit der zu transportierenden Menge von Altmodulen je Jahr für die definierten Rahmenbedingungen aus. Zudem stellen diese Werte stark abstrahierte Beträge dar. Abbildung 5-37 zeigt die ermittelten Funktionen in einem kartesischen Koordinatensystem.

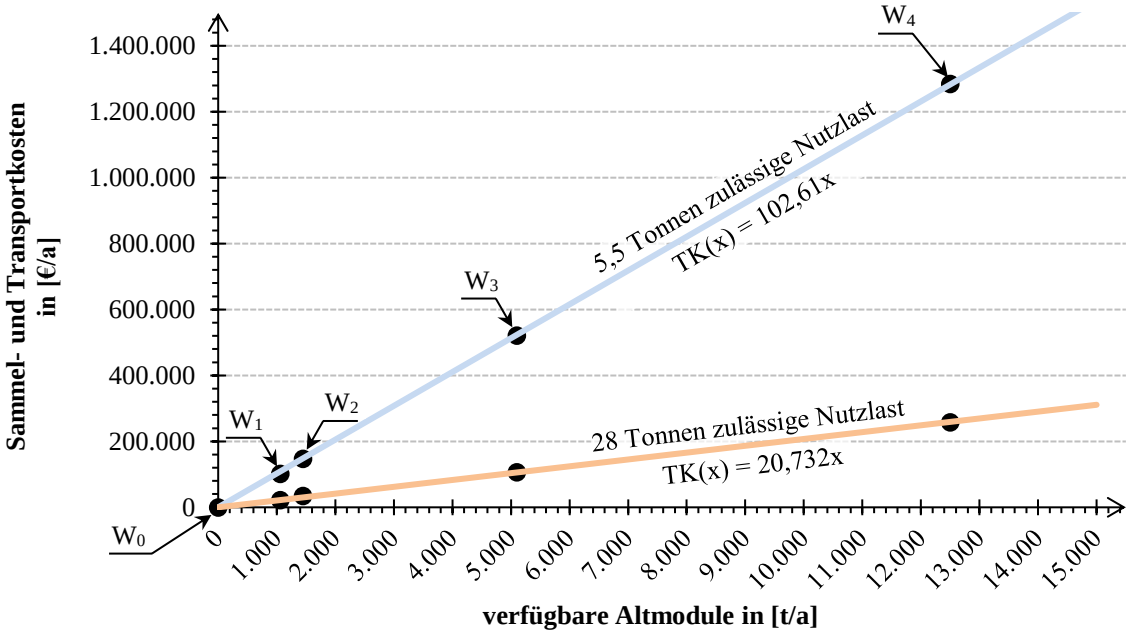


Abbildung 5-37: Graphische Darstellung der von der Bezugsmenge x abhängigen Sammel- und Transportkostenfunktionen für die definierten Rahmenbedingungen und einen Fuhrpark mit Fahrzeugen von 5,5 Tonnen sowie 28 Tonnen zulässiger Nutzlast.

Die Näherungslösungen zur Kalkulation der Sammel- und Transportkosten in Abhängigkeit der annuell verfügbaren Altmodule in den Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters beträgt für einen Fuhrpark mit Transportfahrzeugen einer zulässigen Nutzlast von 5,5 Tonnen:

$$TK(x) = 102{,}61 * x \qquad \textbf{Formel 5-14}$$

und für einen Fuhrpark einer zulässigen Nutzlast von 28 Tonnen[166]:

$$TK(x) = 20{,}732 * x \qquad \textbf{Formel 5-15}$$

Von übergeordneter Brisanz ist dabei jedoch, dass diese mathematischen Näherungslösungen, wie bereits öfters verdeutlicht, nur für die definierten Rahmenbedingungen Gültigkeit besitzen. Zudem handelt es sich um stark abstrahierte und modellgebundene Zusammenhänge.

[166] Die realen Kosten liegen in diesem Fall vor allem für geringe Transportmengen unter 2.000 t/a wesentlich höher, da keine Auslastung der Fahrzeuge möglich ist.

Mittels der Näherungslösungen nach Formel 5-14 und 5-15 zur Skalierung der Sammel- und Transportkosten sind nun die benötigten Abhängigkeiten beider Kostenrubriken von der Bezugsmenge *x* bekannt. Infolgedessen lassen sich alle für die dynamische Beschreibung der Gewinnschwelle nach Formel 5-12 desideraten Terme durch ihre internen Abhängigkeiten beschreiben und ersetzen. Es ergibt sich in Folge der Substitution der Terme für ein $\text{Recycling}_{\text{VR}}$ unter den definierten Rahmenbedingungen und dem Transport mit Fahrzeugen einer zulässigen Nutzlast von 5,5 Tonnen nachstehende Beziehung:

$$\sum_{i=1}^{n}(P_i * I_i) * x * S_E = \underbrace{VK(x)}_{817.511{,}75 * e^{\left(\frac{-977{,}9256}{x+374{,}5}\right)}} + \underbrace{TK(x)}_{102{,}61 * x} \qquad \textbf{Formel 5-16}$$

$$636{,}91 * x = 817.511{,}75 * e^{\left(\frac{-977{,}9256}{x+374{,}5}\right)} + 102{,}61 * x$$

Durch Umstellung der Funktionsterme und mathematische Vereinfachungen lässt sich der zu erwartende Gewinn/Verlust (im Folgenden mit *GV(x)* gekennzeichnet) direkt in Abhängigkeit der Bezugsmenge *x* berechnen und ergibt sich mit der Einheit € je Jahr zu:

$$GV(x) = 534{,}3 * x - 817.511{,}75 * e^{\left(\frac{-977{,}9256}{x+374{,}5}\right)} \qquad \textbf{Formel 5-17}$$

Für Funktionswerte größer 0 resultieren aus dem zugehörigen Argument direkt die zu erwartenden jährlichen pagatorischen Gewinne; für negative Werte analog die jährlichen pagatorischen Verluste. Zu beachten ist, dass das Funktionsargument *x* simultan die gesamte verfügbare annuelle Altmodulmenge der betrachteten Region, die ausgelastete Kapazität der Recyclingaktivität und die recycelte Menge an Altmodulen beschreibt; sich alle drei Mengen je fixierter Ausprägung gleichen. Wird die Formel 5-17 dem Funktionswert 0 gleichgesetzt, definiert deren Nullstelle die Ausprägung von *x*, die für den Break-even (der Überschreitung der Gewinnschwelle) notwendig ist. Dieser beträgt für das definierte System 500,259 Tonnen kristalline Siliziumsolaraltmodule je Jahr. Würde anstelle der Formel 5-14 die Formel 5-15 die Rubrik der Sammel- und Transportkosten der Formel 5-12 beschreiben, würde folglich ein geringerer jährlicher Altmodulstrom zur Erreichung der Gewinnschwelle resultieren. Bei sonst gleichen Bedingungen wären sonach lediglich circa 333,11 Tonnen gSSM_{alt} je Jahr zur Erreichung der Gewinnschwelle obligat. Aus der vorangegangenen Diskussion um die Auslegung des Fuhrparkes wurde jedoch deutlich, dass eine Beschaffungslogistik mittels Fahrzeugen einer Nutzlast von 28 Tonnen zum Transport solch geringer Mengen nicht zielführend ist. Dies wurde für

die Ausprägungen von *x* in Höhe von 1.062,26 t/a und 1.450 t/a substanziiert. Beide Werte liegen signifikant über den berechneten Break-even, selbst im „teureren“ Fall der Formel 5-14. Infolgedessen wird von der Betrachtung mittels der Formel 5-15 abgesehen – besonders hinsichtlich des Bereiches um den Break-even. Dies hat in der Konsequenz zugleich den positiven Effekt, als dass sich dadurch eine Art obere Schranke ergibt, welche für eine konservative Diskussion den berechneten Werten hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit etwaiger Recyclingaktivitäten zusätzliche Sicherheit bietet.

Nachstehende Abbildung 5-38 stellt die einzelnen Terme der Funktion 5-16 graphisch gegenüber, wobei zudem die aus der Summe der Kostenseite resultierenden Gesamtkosten mit aufgeführt sind.

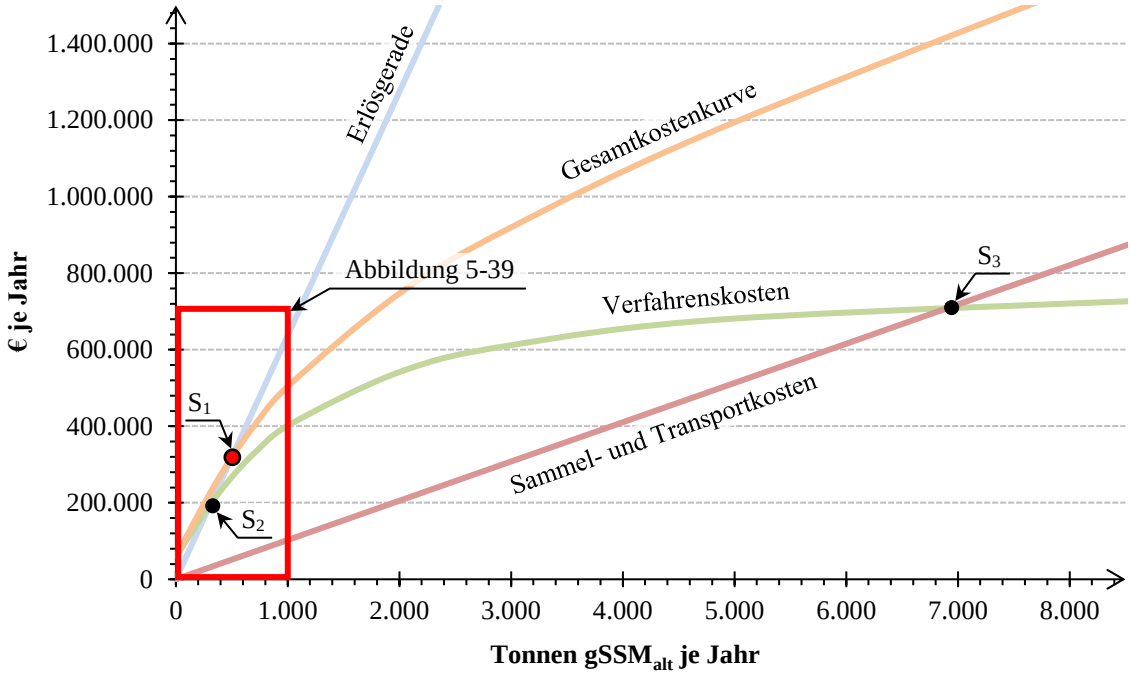


Abbildung 5-38: Darstellung der Einzelterme der Formel 5-16 im kartesischen Koordinatensystem inklusiver der Gesamtkostenkurve für die definierten Systemgrenzen.

Der rot umrandete Bereich findet sich zur besseren Übersicht in der Abbildung 5-39 auf der nachfolgenden Seite als Detailausschnitt nochmals separat dargestellt, worin markierten Schnittpunkte S_1 und S_2 ebenfalls wiederzufinden sind. Lediglich der Schnittpunkt S_3 wurde aus Gründen der Darstellbarkeit nicht nochmals aufgegriffen. Dieser gibt die Menge an, bei der die Transportkosten die Verfahrenskosten übersteigen; der Anteil der Transportkosten an den Gesamtkosten steigt über 50 %. Das entsprechende Funktionsargument beträgt 6.974 Tonnen Altmodule je Jahr bei jeweils 715.624,57 € je Jahr. Allerdings ist dieser Punkt kritisch zu betrachten, da der Transport von vergleichsweise hohen Altmodulmengen mittel Fahrzeugen einer zulässigen Nutzlast von

28 Tonnen den Transport mit 5,5 Tonnen Nutzlast ökonomisch dominiert. Wird die Formel 5-15 zugrunde gelegt, ergäbe sich der Schnittpunkt S_3 bei 42.532 Tonnen je Jahr. Zu beachten wäre bei dieser Kalkulation die Nutzung der Formel 5-5 (Logarithmusfunktion) zur Beschreibung der Verfahrenskosten (vgl. hierzu Kapitel 5.4.3.1). Allerdings macht diese Betrachtung deutlich, dass mit steigendem Altmodulaufkommen in einer definierten Region auch der Bedarf einer adäquaten transportwirtschaftlichen Optimierung zur Senkung der Sammel- und Transportkosten zunimmt. Die Diskussion etwaiger Optimierungsansätze findet im Kapitel 5.6 gesondert statt.

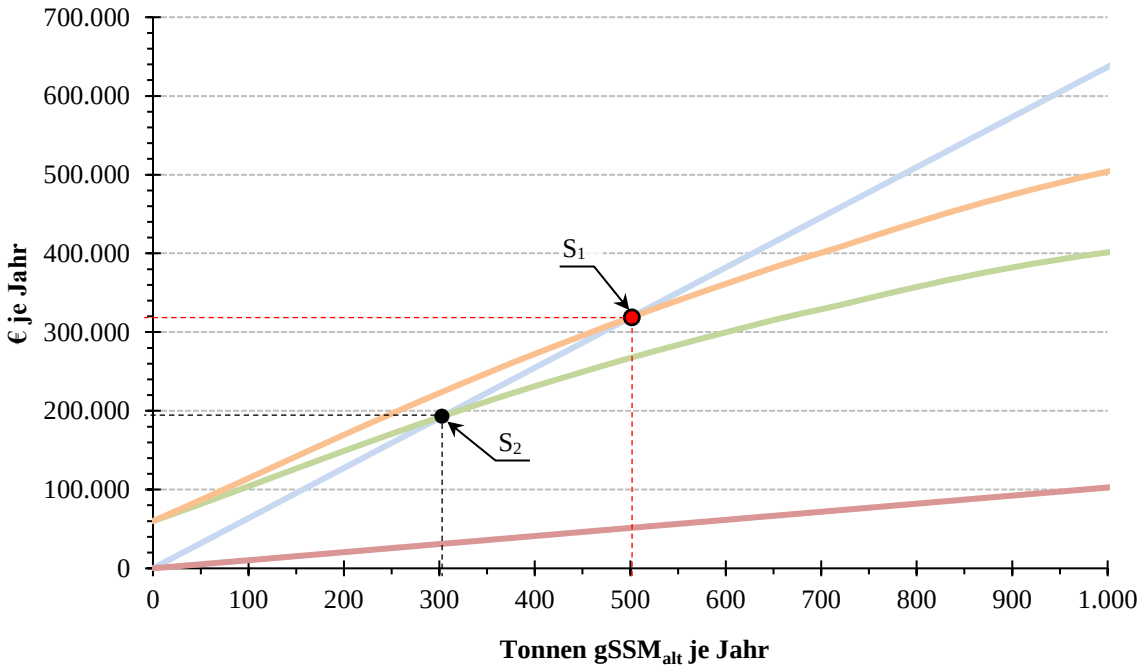


Abbildung 5-39: Detailausschnitt Abbildung 5-38 für $0 \leq x \leq 1.000$ Tonnen je Jahr.

Der in beiden Abbildungen mit S_1 gekennzeichnete Schnittpunkt der Gesamtkosten und der Erlösgeraden markiert die bereits berechnete desiderate jährliche Menge Altmodule zur Überschreitung der Gewinnschwelle von 500,259 Tonnen. Die zugehörigen Gesamtkosten und der Erlös belaufen sich beide auf jeweils 318.619,95 € je Jahr. Der Schnittpunkt S_2 findet sich genau an der Stelle, die bereits in der Diskussion um die Abbildung 5-36 mit 303,194 Tonnen $gSSM_{alt}$ je Jahr angegeben wurde. Wenngleich diese Menge Altmodule geringer als die berechnete Menge (S_1) für den Break-even ist und so insgesamt zwar ein Verlust generiert (Erlöse sind geringer als die Kosten) wird, können damit zumindest die integrierten Verfahrenskosten in Höhe von 193.107,28 € je Jahr einer Recyclingaktivität mit der entsprechenden Kapazität gedeckt werden. Die Differenz zur Gewinnschwelle gleicht den zugehörigen Sammel- und Transportkosten.

Der Bereich zwischen Gesamtkostenkurve und Erlösgeraden besitzt ohnedem eine besondere Signifikanz im Sinne der Wirtschaftlichkeit etwaiger Recyclingaktivitäten; je nach Betrag gleicht er dem zu erwartenden Gewinn oder Verlust. Dieser lässt sich, wie bereits angedeutet, direkt über die Formel 5-17 berechnen. Abbildung 5-40 stellt diese Beziehung graphisch dar. Die abgetragenen Funktionswerte gleichen entsprechend dem Abstand der Erlösgeraden und der Gesamtkostenkurve der vorangegangenen Abbildung 5-39, wobei negative Funktionswerte einen pagatorischen Verlust beschreiben, positive analog einen Gewinn.

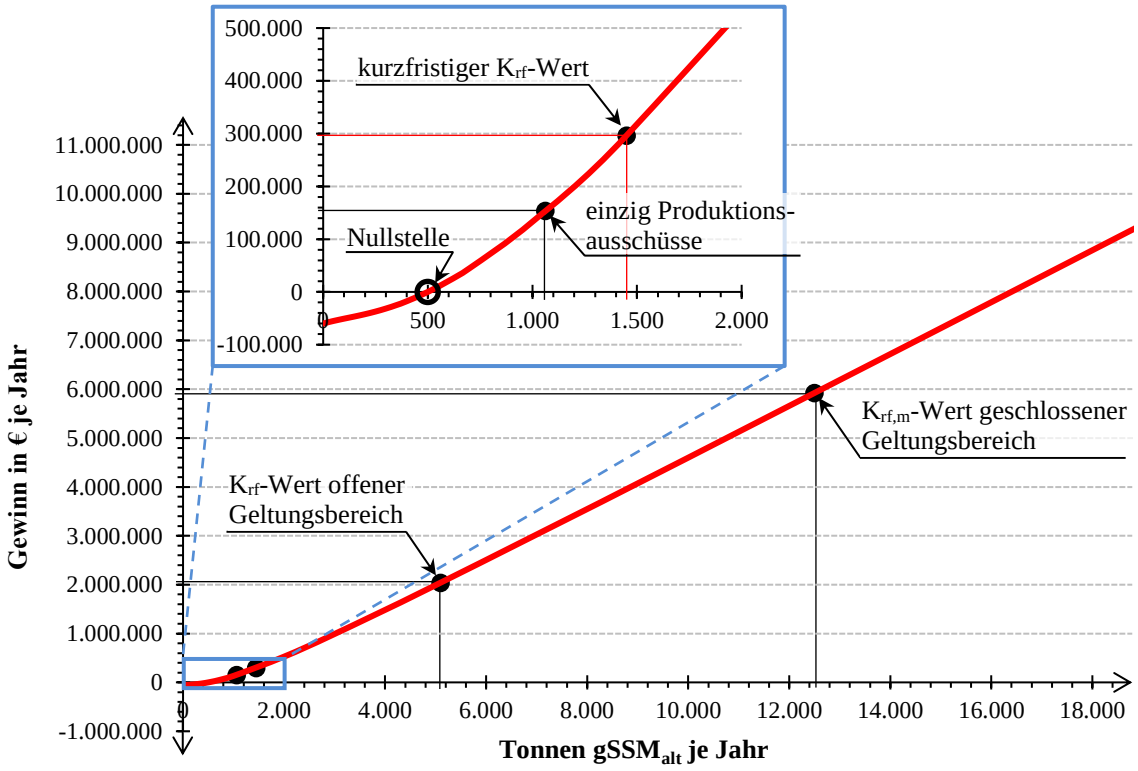


Abbildung 5-40: Gewinn und Verlust in Abhängigkeit der Bezugsmenge x nach Formel 5-17.

Die Nullstelle liegt definitionsgemäß bei 500,259 Tonnen und entspricht dem Break-even. Laut dieser Abbildung und der zugehörigen Formel 5-17 ergäbe sich beispielshalber für das Beispiel des Recycling$_{VR}$ von 1.062,26 Tonnen Produktionsausschüssen in den Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters ein pagatorischer Gewinn von jährlich 153.667,83 €; bei 1.450 Tonnen (kurzfristiger K_{rf}-Wert) bereits 296.420,35 € je Jahr. Für den K_{rf}-Wert im offenen Geltungsbereich von 5.100 Tonnen jährlich verfügbarer und recycelter Altmodule bei gleichzeitiger Auslegung der Recyclingkapazität sonach 2.041.152,61 € je Jahr und für den $K_{rf,m}$-Wert im geschlossenen Geltungsbereich (12.500 Altmodule je Jahr) jährlich 5.921.035,29 €.

Seit 2011 und bis zum Eintreten der prognostizierten Massenströme ab dem Jahr 2028 liegt das jährliche Aufkommen kristalliner Siliziumsolaraltmodule in der betrachteten Region des ostdeutschen PV-Produktionsclusters jedoch über dem kurzfristigem K_{rf}-Wert von 1.450 Tonnen. Wird dieser als Diskussionsgrundlage gewählt, ergibt sich sonach wiederum einen untere Schranke. Allerdings sind die zugehörigen Massenströme circa 3-mal so hoch wie zur Überschreitung der Gewinnschwelle erforderlich – und das seit mehreren Jahren. Aus dem Recycling dieser konstanten, regional verfügbaren Mindestmenge resultiert ein pagatorischer jährlicher Gewinn von 296.420,35 € (modellbedingt). Neben der Absenz einer technischen Restriktion scheint sonach vorerst auch keine ökonomische Erklärung für die Disproportionalität zwischen dem Stand der zur Verfügung stehenden hochwertigen verfahrenstechnischen Lösungsansätze und deren industriellen Anwendung zu existieren.

Dies kann sich jedoch auch als Trugschluss herausstellen, da ein entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit einer potenziellen Recyclingaktivität bislang ob des Fokus der Betrachtung auf den statisch „laufenden“ Betrieb einer etwaigen Recyclingaktivität und der Ermittlung des Break-even gezielt aus der Diskussion exkludiert wurde: die Investitionskosten und deren Rückfluss.

5.4.5.3 Nettogegenwartswert

Wenngleich der Betrieb einer Anlage zum Recycling$_{VR}$ von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen für das Beispiel des ostdeutschen PV-Produktionsclusters bereits bei einer Auslegung der Kapazität entsprechend des kurzfristigen K_{rf}-Wertes einen jährlichen Überschuss zu erwirtschaften vermag, muss dieser periodische Zahlungsstrom die Anfangsinvestition innerhalb eines sinnvollen Planungshorizontes nicht nur amortisieren, er sollte darüber hinaus eine Rendite oberhalb alternativen Anlagenoptionen generieren. Ist dies nicht der Fall, ergibt sich aus finanztheoretischer Sicht eine ökonomische Restriktion, die eine Realinvestition als notwendige Bedingung für die Initiierung einer potenziellen Recyclingaktivität behindert und sonach einen ersten Erklärungsansatz für die gegenwärtige Disproportionalität zwischen dem Stand der zur Verfügung stehenden hochwertigen verfahrenstechnischen Lösungsansätze und deren industriellen Anwendung liefern könnte. Dieserhalb liegt der Fokus des vorliegenden Unterkapitels auf der Untersuchung des Einflusses der initialen Investitionskosten und der zugehörigen annuellen Zahlungsströme auf die Investitionsentscheidung.

Weil es sich per Definition um eine Investition (Transaktion, deren Zahlungsstrom mit einer Auszahlung beginnt und ab einem zukünftigen Zeitpunkt Einzahlungen generiert) in ein Sachvermögen handelt, entspricht die Betrachtung den finanztheoretischen Anforderungen an eine Realinvestition. Hierfür stellen die Methode zur Ermittlung des Nettogegenwartswertes[167] und die interne Zinsfußmethode die gängigen Untersuchungswerkzeuge dar, wobei in Sonderheit des Mehrperiodenfalls die Methode zur Ermittlung des Nettogegenwartswertes (nachstehend als Kapitalwertmethode bezeichnet und mit KW-Methode abgekürzt) der internen Zinsfußmethode vorzuziehen ist. [Kraft 2007]

Grundlegende Modellmechanik der Kapitalwertmethode ist die Berücksichtigung des Zeitwertes der annuellen Zahlungsströme. Diese werden zum Zwecke der Vergleichbarkeit gänzlich auf den Zeitpunkt der initialen Investitionszahlung (Zeitpunkt t_0) abgezinst. Die theoretische Fundierung für die Anwendbarkeit dieser Vereinfachung liefert das Separationstheorem von Fisher, welches unter der zentralen Annahme eines vollkommenen Kapitalmarktes das Realinvestitionsvolumen von den Konsumpräferenzen eines potenziellen Investors entkoppelt. Bei sicheren Erwartungen bezüglich der finanziellen Konsequenzen von finanzwirtschaftlichen Maßnahmen ist ein vollkommener Kapitalmarkt dadurch definiert, dass erstens keine institutionellen Beschränkungen existieren. Dies begreift die Gleichheit der Soll- und Habenzinssätze ein, die Absenz von Finanzierungslimits und Leerverkaufsbeschränkungen sowie die beliebige Teilbarkeit der Finanztitel. Zweitens fallen keine Transaktionskosten und keine Steuern an. Drittens besitzen alle Akteure homogene Erwartungen an die Zahlungsströme von allen Finanztransaktionen. Viertens existiert kein Monopolist und fünftens verursachen Investitionsentscheidungen keine externen Effekte.

Die Normierung aller Zahlungsströme einer Investition auf einen Bezugszeitpunkt ermöglicht im Ergebnis sowohl eine Vergleichbarkeit verschiedener Realinvestitionen untereinander als auch eine Bewertung des Marktwertes einer Realinvestition sowie deren finanztheoretische Sinnhaftigkeit. Ergibt die Diskontierung der Zahlungsströme eines bestimmten Bezugszeitraums inklusive der initialen Investitionszahlung unter vorgegebene Rahmenbedingungen in Summe einen positiven Wert, resultiert aus der Investition eine finanzielle Besserstellung; eine Erhöhung der Konsummöglichkeit. Dies gilt jedoch nur unter der Annahme, dass der zukünftige Konsum irrelevant ist. Lediglich

[167] Äquivalente Kurzformen: Kapitalwert, Barwert; englisch: net present value; gängige Abkürzungen: KW, NPV

der Konsum zum Zeitpunkt t_0 ist als Vergleichsgröße von Interesse. Laut [Kraft 2007] und [Laitenberger 2008] ergibt sich so eine von den Nutzenpräferenzen potenzieller Investoren losgelöste Betrachtung, da einzig das Vorzeichen der diskontierten Summe die Investitionsentscheidung bestimmt. Der Betrag jener Summe der auf den Bezugszeitpunkt abgezinsten annuellen Zahlungsströme und des initialen Investitionsbetrages wird als der Nettogegenwartswert (Kapitalwert) der Investition verstanden. Für Beträge gleich null ist es unerheblich, ob der Investor die Realinvestition tätigt, oder ob er den gleichen Betrag zum entsprechenden Kalkulationszinssatz anderweitig (beispielshalber am Kapitalmarkt) anlegt. Der zugehörige Zinssatz definiert den internen Zinsfuß.

Im Sinne der vorliegenden Arbeit stellen die Investitionskosten zum Zeitpunkt t_0 die Kosten zur Initiierung der Recyclingaktivität dar. Dies begreift beispielshalber Ausgaben für Grundstücke, Anschaffungskosten für Maschinen, Baukosten et cetera ein. Die annuellen Zahlungsströme ergeben sich aus der szenarienbezogenen Betrachtung der Potenziale eines $\text{Recycling}_{\text{VR}}$ in den regionalen Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters des vorangegangenen Kapitels und spiegeln die jeweiligen jährlichen pagatorischen Gewinne wieder, die aus dem Betrieb mit einer Anlagenkapazität entsprechend des kurzfristigen K_{rf}-Wertes, des K_{rf}-Wertes im offenen Geltungsbereich und des $K_{rf,m}$-Wertes im geschlossenen Geltungsbereich resultierten. Die Formel der KW-Methode stellt sich, angelehnt an die in dieser Arbeit definierten Variablen mit I_0 für die initiale Investitionssumme und r_K für den Kalkulationszinssatz, in allgemeiner Form wie folgt dar:

$$KW = -I_0 + \sum_{t=1}^{T_f} \frac{GV_t}{(1 + r_K)^t} \qquad \textbf{Formel 5-18}$$

Die einzelnen diskontierten Zahlungsströme exklusive I_0 ergeben sich je nach betrachteten Szenario aus den zugehörigen annuellen *GV*-Werten. Die modellgebundene Vereinfachung, dass diese innerhalb eines Szenarios über den betrachteten Zeitraum konstant bleiben, soll nun auch an dieser Stelle beibehalten werden. Die Summierung dieser auf den Zeitpunkt der initialen Investitionszahlung $t = 0$ abgezinsten Einzelwerte begreift sonach für den betrachteten Zeitraum für jedes Jahr den gleichen Ausgangswert in Form des szenariengebundenen *GV* ein, beginnend mit dem ersten erwirtschafteten positiven oder negativen Gewinn des laufenden Betriebs ($t = 1$) bis einschließlich dem Betriebsjahr $t = T_f$. Allerdings bedarf die Berechnung des KWs neben der Bestimmung

der jährlichen *GV*s sowohl eine zuvor festgelegte Zeitspanne (T_f) als auch die Kenntnis über den Betrag der initialen Investitionssumme I_0 sowie des Kalkulationszinssatz r_K. Die drei Variablen T_f, I_0 und r_K sind jedoch bislang unbekannt. Für die weitere Betrachtung wird die Berechnung des *KW* deshalb nicht in Form von Einzelwerten erfolgen, sondern vielmehr als Funktion der betrachteten Zeitspanne. Aus szenariospezifischen Annahmen für r_K und I_0 resultieren so *KW*s je Betriebsjahr bis $t = T_f$. Zudem werden nicht nur einzelne Werte für r_K und I_0 zugrunde gelegt. In einem ersten Schritt sind deshalb, angelehnt an die Methodik einer Sensititvitätsanalyse, eine Bandbreite verschiedener und für das entsprechende Szenario als entscheidungsrelevant zu betrachtender Werte für die Variable I_0 einzubeziehen, was letztlich zu einer Darstellung von Funktionsscharren führt. Die Bandbreite der Variable r_K ist indessen für jedes Szenario gleich. Aus diesen Funktionsscharren werden anschließend prägnante Punkte bestimmter Kriterien wiederum zu einzelnen Funktionen zusammengefasst. Für dieses Vorhaben wird vereinfachend ein laufzeitunabhängiger Kalkulationszins angenommen, eine sogenannte flache Zinsstruktur.

Wenngleich eine pauschale Diskontierung sämtlicher Zahlungsströme mit einem konstanten Kalkulationszins nicht realitätsnah ist, kann sie jedoch als gängige Praxis zur Vereinfachung der KW-Methode betrachtet werden. Grundlegend soll der Kalkulationszinssatz r_K der besten Anlagenalternative (Opportunitätskostenprinzip) gerecht werden. Bei theoretischen Betrachtungen, die alleinig die rationale Sinnhaftigkeit einer Investition untersuchen, wird laut [Kraft 2007] der Kalkulationszinssatz zumeist aus einer risikoäquivalenten Kapitalmarktanlage abgeleitet.[168] Ergibt sich daraus ein positiver Kapitalwert, erzielt die Investition eine Rendite über jener Vergleichsanlage. Im Zuge einer Grenzwertbetrachtung kann der Kalkulationszinssatz bei einer Fremdfinanzierung folglich als Maximalzinssatz der Rentabilität des Projektes angesehen werden; bei Eigenfinanzierung als Maximalzinssatz der Alternativinvestition. Allerdings ist nach [Laitenberger 2008] die KW-Methode in ihrem Ergebnis unabhängig von der Art der Finanzierung, lediglich die Ergebnisinterpretation ist auf die zugrunde liegende Kapitalstruktur zu beziehen. Um der Vielfalt der potenziellen Kalkulationszinssätze gerecht zu werden, werden die szenariengebundenen Berechnungen der einzelnen Kapitalwerte deshalb jeweils für die Kalkulationszinssätze 0,1 %; 0,5 %, 1%; 2 %; 3 %;

[168] Mitunter wird dem Kalkulationszinssatz zusätzlich auch eine Risikoprämie zugeschrieben. Diese soll das Kreditausfallrisiko berücksichtigen, was sich an der Bonität der Schuldner orientiert.

5 % und 8 % durchgeführt. Dieses Spektrum soll letztlich in der Konsequenz sämtliche Variationen der Kapitalstruktur einbinden. Die Europäischen Kommission schlägt laut [Sartori *et al.* 2014] einen durchschnittlichen langzeitinflationsbereinigten Zinssatz in Höhe 2,9 % als Kalkulationszinssatz vor. Ein ähnliches Ergebnis mit einem Basiszinssatz gemäß IDW (Institut der Wirtschaftsprüfer) für das Jahr 2014 in Höhe von rund 2,5 % (langfristiger risikofreier Zins) liefert [Fenebris GbR o.J.]. Für das Jahr 2017 wird hingegen bereits ein langfristiger risikofreier Basiszins gemäß IDW in Höhe von rund 1,2 % angegeben. Das gewählte Zinsspektrum für die Kalkulation der *KW*s deckt sowohl diese risikofreien Kalkulationszinssätze sinnvoll ab, als auch potenzielle zusätzliche Marktrisikoprämien. Gleichwohl sind mittels der niedrigen Werte auch kurzfristige Alternativen für risikoaverse Investoren einbegriffen.

Aufgrund der Vielzahl der zu erwartenden Einzelwerte je Szenario kommt folgende Verfahrensweise nachstehend zur Anwendung. Der grundlegende Rechenweg wird anhand einer eingangs gewählten Konfiguration von I_0 und r_K detailliert dargelegt. Die Kombination der Möglichkeiten aus der Modifikation beider Variablen in den vorgegebenen Bereichen wird lediglich in deren Ergebnissen diskutiert, sofern der zuvor beschriebene Algorithmus unverändert bleibt. Abschließend werden die resultierenden Lösungsmengen dann in einer aggregierenden Darstellung untersucht und bewertet.

Das erste zu betrachtende Szenario orientiert sich am kurzfristigen K_{rf}-Wert, der dem Recycling_{VR} von 1.450 Tonnen kristallinen Siliziumsolaraltmodulen in den Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters einen pagatorischen Gewinn von jährlich 296.420,35 € zuschreibt. Dieser Gewinn definiert die konstanten GV_t-Werte der Formel 5-18. Für einen Betrachtungszeitraum von beispielshalber einem Jahr (T_f = 1) ergibt sich der abgezinste Betrag, der letztlich von der Investitionssumme abzuziehen ist zu:

$$\frac{296.420{,}35}{(1+r_K)^1} \qquad \textbf{Formel 5-19}$$

Wird für r_K beispielshalber 3 % eingesetzt, resultiert ein abgezinster Bezugswert von 287.786,75 €. Wird der Betrachtungszeitraum auf zwei Jahre erhöht, kommen zu diesem Betrag noch:

$$\frac{296.420{,}35}{(1+0{,}03)^2} = \underline{\underline{279.404{,}61\ €}} \qquad \textbf{Formel 5-20}$$

hinzu. Tabelle 5-24 zeigt alle Einzelbeiträge, welche sich dieser Handhabe folgend für r_K = 3 % ergeben und ordnet diese dem entsprechenden Bezugszeitpunkt zu.

Tabelle 5-24: Abgezinste Zahlungsströme in Einzelwerten für r_K = 3 % bezogen auf das entsprechende Betriebsjahr für 20 Jahre.

t	Abgezinster Zahlungsstrom	t	Abgezinster Zahlungsstrom	t	Abgezinster Zahlungsstrom	t	Abgezinster Zahlungsstrom
1	287.786,75 €	6	248.247,38 €	11	214.140,37 €	16	184.719,36 €
2	279.404,61 €	7	241.016,87 €	12	207.903,27 €	17	179.339,19 €
3	271.266,61 €	8	233.996,96 €	13	201.847,83 €	18	174.115,72 €
4	263.365,64 €	9	227.181,52 €	14	195.968,77 €	19	169.044,38 €
5	255.694,80 €	10	220.564,59 €	15	190.260,94 €	20	164.120,76 €

Obzwar diese Zeitreihe unendliche fortzusetzen ist, stellen 20 Jahre als maximaler Zeitraum für den Rückfluss der Investition eine adäquate Schranke dar. Diese Einzelwerte sind je nach Laufzeit kumuliert der negativen Investitionssumme zuzurechnen. Werden beispielshalber 2.500.000 € als Investitionssumme für eine Recyclinganlage einer Kapazität von 1.450 Tonnen $gSSM_{alt}$ je Jahr angesetzt, resultieren bei einem Kalkulationszinssatz von 3 % die in der nachstehenden Tabelle 5-25 aufgeführten Kapitalwerte in Abhängigkeit der Laufzeit *t*.

Tabelle 5-25: Kapitalwert in Abhängigkeit der Laufzeit einer Investition in Höhe von 2.500.000 € bei einem Kalkulationszinssatz von r_K = 3 % für 20 Jahre.

t	Kapitalwert(t)	t	Kapitalwert(t)	t	Kapitalwert(t)	t	Kapitalwert(t)
1	-2.212.213,25 €	6	-894.234,22 €	11	242.666,08 €	16	1.223.366,26 €
2	-1.932.808,64 €	7	-653.217,35 €	12	450.569,35 €	17	1.402.705,45 €
3	-1.661.542,03 €	8	-419.220,38 €	13	652.417,18 €	18	1.576.821,16 €
4	-1.398.176,39 €	9	-192.038,87 €	14	848.385,95 €	19	1.745.865,54 €
5	-1.142.481,59 €	10	28.525,71 €	15	1.038.646,90 €	20	1.909.986,31 €

Orange hinterlegte Zellen der Tabelle 5-25 signalisieren negative Ausprägungen des Kapitalwertes in Abhängigkeit des Bezugszeitpunktes; blau Zellen entsprechend positive Beträge. Bei einer Investitionssumme von 2.500.000 € und einem Kalkulationszinssatz von 3 % scheint eine Investition unter konstanten Rahmenbedingungen sonach erst im zehnten Betriebsjahr finanzmathematisch vorteilhaft. Ein Investor müsste unter diesen Umständen folglich nahezu 10 Jahre Laufzeit ansetzen, wenn er zum Zeitpunkt $t = 0$ zusätzlich konsumieren möchte. Tabelle 5-26 auf nachfolgender Seite variiert zusätzlich die Investitionssumme I_0 in 250.000 €-Schritten für den Bereich zwischen 250.000 € und 3.250.000 €, wobei die Kennung von positiven und negativen *KW*s beibehalten bleibt.

Tabelle 5-26: Kapitalwert in Abhängigkeit der Laufzeit bei einem Kalkulationszinssatz von r_K = 3 % und variierender Investitionssumme exemplarisch für eine Betriebszeit von 15 Jahren.

Angaben in €	Betriebszeit														
I_0 in €	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-250.000,00	37.786,75	317.191,36	588.457,97	851.823,61	1.107.518,41	1.355.765,78	1.596.782,65	1.830.779,62	2.057.961,13	2.278.525,71	2.492.666,08	2.700.569,35	2.902.417,18	3.098.385,95	3.288.646,90
-500.000,00	-212.213,25	67.191,36	338.457,97	601.823,61	857.518,41	1.105.765,78	1.346.782,65	1.580.779,62	1.807.961,13	2.028.525,71	2.242.666,08	2.450.569,35	2.652.417,18	2.848.385,95	3.038.646,90
-750.000,00	-462.213,25	-182.808,64	88.457,97	351.823,61	607.518,41	855.765,78	1.096.782,65	1.330.779,62	1.557.961,13	1.778.525,71	1.992.666,08	2.200.569,35	2.402.417,18	2.598.385,95	2.788.646,90
-1.000.000,00	-712.213,25	-432.808,64	-161.542,03	101.823,61	357.518,41	605.765,78	846.782,65	1.080.779,62	1.307.961,13	1.528.525,71	1.742.666,08	1.950.569,35	2.152.417,18	2.348.385,95	2.538.646,90
-1.250.000,00	-962.213,25	-682.808,64	-411.542,03	-148.176,39	107.518,41	355.765,78	596.782,65	830.779,62	1.057.961,13	1.278.525,71	1.492.666,08	1.700.569,35	1.902.417,18	2.098.385,95	2.288.646,90
-1.500.000,00	-1.212.213,25	-932.808,64	-661.542,03	-398.176,39	-142.481,59	105.765,78	346.782,65	580.779,62	807.961,13	1.028.525,71	1.242.666,08	1.450.569,35	1.652.417,18	1.848.385,95	2.038.646,90
-1.750.000,00	-1.462.213,25	-1.182.808,64	-911.542,03	-648.176,39	-392.481,59	-144.234,22	96.782,65	330.779,62	557.961,13	778.525,71	992.666,08	1.200.569,35	1.402.417,18	1.598.385,95	1.788.646,90
-2.000.000,00	-1.712.213,25	-1.432.808,64	-1.161.542,03	-898.176,39	-642.481,59	-394.234,22	-153.217,35	80.779,62	307.961,13	528.525,71	742.666,08	950.569,35	1.152.417,18	1.348.385,95	1.538.646,90
-2.250.000,00	-1.962.213,25	-1.682.808,64	-1.411.542,03	-1.148.176,39	-892.481,59	-644.234,22	-403.217,35	-169.220,38	57.961,13	278.525,71	492.666,08	700.569,35	902.417,18	1.098.385,95	1.288.646,90
-2.500.000,00	-2.212.213,25	-1.932.808,64	-1.661.542,03	-1.398.176,39	-1.142.481,59	-894.234,22	-653.217,35	-419.220,38	-192.038,87	28.525,71	242.666,08	450.569,35	652.417,18	848.385,95	1.038.646,90
-2.750.000,00	-2.462.213,25	-2.182.808,64	-1.911.542,03	-1.648.176,39	-1.392.481,59	-1.144.234,22	-903.217,35	-669.220,38	-442.038,87	-221.474,29	-7.333,92	200.569,35	402.417,18	598.385,95	788.646,90
-3.000.000,00	-2.712.213,25	-2.432.808,64	-2.161.542,03	-1.898.176,39	-1.642.481,59	-1.394.234,22	-1.153.217,35	-919.220,38	-692.038,87	-471.474,29	-257.333,92	-49.430,65	152.417,18	348.385,95	538.646,90
-3.250.000,00	-2.962.213,25	-2.682.808,64	-2.411.542,03	-2.148.176,39	-1.892.481,59	-1.644.234,22	-1.403.217,35	-1.169.220,38	-942.038,87	-721.474,29	-507.333,92	-299.430,65	-97.582,82	98.385,95	288.646,90

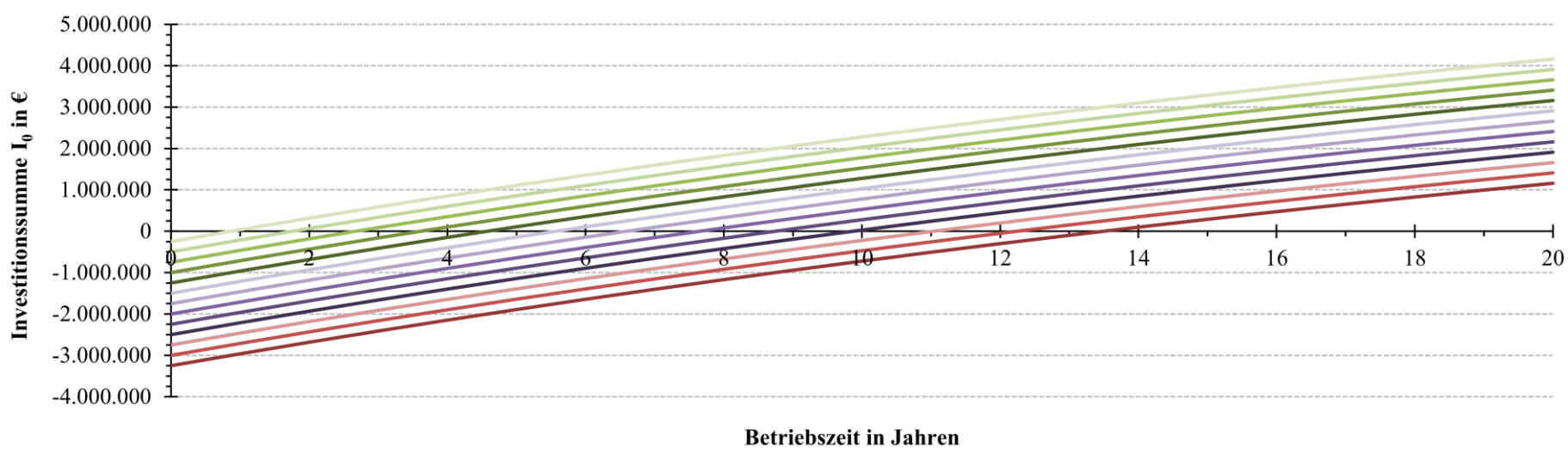


Abbildung 5-41: Kapitalwert in Abhängigkeit der Laufzeit bei einem Kalkulationszinssatz von r_K = 3 % und variierender Investitionssumme dargestellt mittels Interpolation der Werte aus Tabelle 5-26.

In der Tabelle sind allerdings nur die für die spezielle Problemstellung diskussionsrelevanten Betriebszeiten *t* eingepflegt. Dies gilt zudem für die Diskussion und Darstellung potenzieller Bereiche der Investitionssumme, welche überwiegend auf den entscheidungsrelevanten Anteil reduziert werden. Obschon die Ermittlung der *KW*s für jede denkbare Investitionssumme durchzuführen wäre, ist für die ausstehenden Betrachtungen lediglich das Spektrum von Interesse, welches einen Vorzeichenwechsel des Kapitalwertes innerhalb der festgelegten Zeitspanne von 20 Jahren beinhaltet. Genau an diesem Kriterium orientieren sich die untersuchten Werte. Demnach bleibt festzuhalten, dass für alle Investitionssummen, die kleiner als der minimal aufgeführte Wert der im jeweiligen Szenario angegeben Spanne sind, bereits im ersten Betriebsjahr lediglich positive Kapitalwerte existieren; eine weitere Untersuchung würde keinen Erkenntniszugewinn generieren. Ähnlich verhält es sich mit Werten für I_0 über dem Maximalwert der untersuchten Spanne. Diese scheiden aus der Betrachtung aus, da der Kapitalwert, wenn überhaupt, erst nach über 20 Jahren positive Werte ausweisen würde. Zudem kann wiederum mittels einer Grenzwertbetrachtung ein kalkulationszinssatzabhängiges globales Maximum potenzieller Investitionssummen bei nahezu unendlicher Laufzeit ermittelt werden: die ewige Rente. Diese ergibt sich für jeden Zinssatz zu:

$$ewige\ Rente = \frac{GV}{r_K} \qquad \textbf{Formel 5-21}$$

Eine Investitionssumme, die bei gegebenem Kalkulationszins über dem Wert der zugehörigen ewigen Rente liegt, würde nie positive Ausprägungen annehmen. Für das gewählte Beispiel mit r_K = 3 % ergäbe sich sonach ein Maximalbetrag von 9.880.678,33 €, den die Investitionssumme selbst bei unendlicher Laufzeit nie überschreiten sollte.

Die in der Tabelle 5-26 untersuchten Investitionssummen sind farblich hinterlegt. Diese Markierungen wurden in die Abbildung 5-41 auf der gleichen Seite übertragen; sie dienen gleichsam als Legende der Abbildung. Zudem kann die Zuordnung der dargestellten Kurven auch über den Schnittpunkt mit der y-Achse erfolgen, der genau der jeweils zugehörigen Investitionssumme entspricht. Zweck beider Inhalte ist die Ermittlung der Betriebszeit der potenziellen Recyclingaktivität, die unter den gegebenen Rahmenbedingungen einen Kapitalwert von 0 ausweist. Dieser Zeitpunkt beschreibt folglich die Mindestlaufzeit, die die Investition bei den fixierten Gegebenheiten benötigt, um eine finanzmathematische Profitabilität als grundlegendes Investitionskriterium zu besitzen. Dieser Punkt ist für alle in Abbildung 5-41 aufgeführten Kurven durch die jeweilige

Nullstelle definiert. Der Break-even des Kapitalwertes kann aber auch direkt berechnet werden. Hierfür ist der Tabelle 5-26 für die entsprechende Investitionssumme das Betriebsjahr zu entnehmen, welches in der zugehörigen Reihe als erstes blau hinterlegt ist. Der enthaltene Wert ist mit dem Einzelwert für das entsprechende Bezugsjahr nach Formel 5-20 ins Verhältnis zu setzen und vom Bezugszeitpunkt zu subtrahieren. Für das gewählte Beispiel einer Anfangsinvestition von 2.500.000 € bei einem r_K von 3 % ergäbe sich der Break-even des Kapitalwertes nach rund 9,87 Jahren.

In analoger Weise werden die Break-evens der Kapitalwerte für die weiteren Kalkulationszinsätze in Höhe von 0,1 %; 0,5 %, 1%; 2 %; 5 % und 8 % berechnet. Betreffende Einzelwerte finden sich im Anhang 5-8. Diese vom Kalkulationszinssatz und der Investitionssumme abhängige Gesamtheit der Break-evens der Kapitalwerte ist in nachstehender Abbildung 5-42 zusammenfassend dargestellt, wobei die Werte für jeden Kalkulationszinssatz anhand der Gruppierung interpoliert wurden und die Investitionssumme das Funktionsargument stellt.

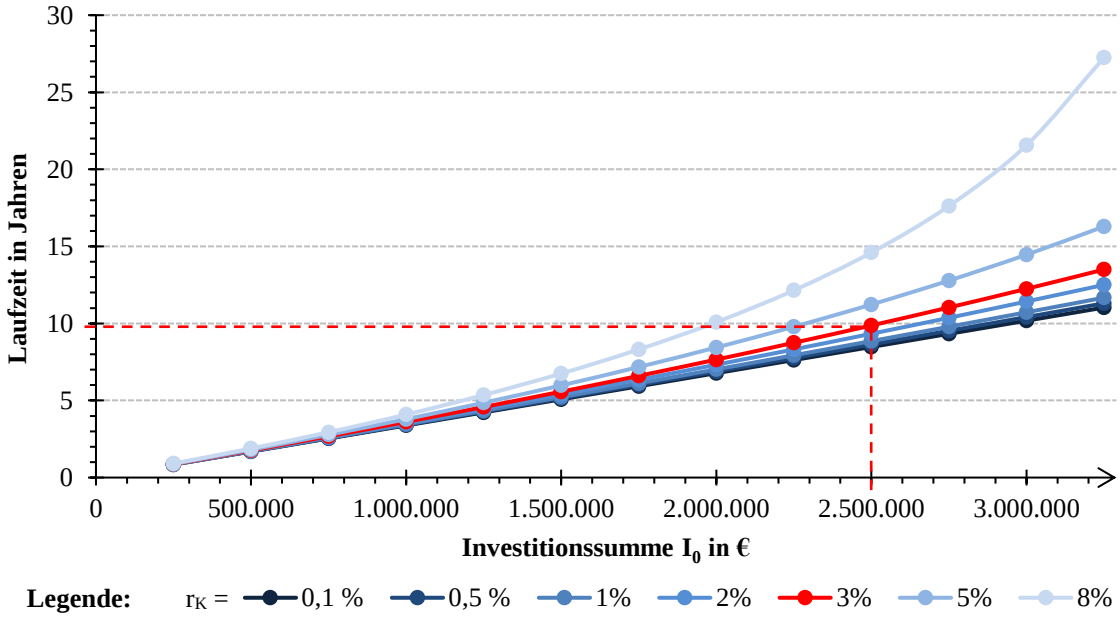


Abbildung 5-42: Break-even der Kapitalwerte nach Laufzeit der Investition für verschiedene Kalkulationszinssätze in Abhängigkeit der Investitionshöhe.

Aus der Abbildung 5-42 lassen sich nun für das zugrunde liegende Szenario des kurzfristigen K_{rf}-Wertes folgende Aussagen ableiten. Erstens sollte aus Investorensicht der Planungshorizont bei einer Investitionssumme vom mehr als 3.000.000 € mindestens 10 Jahre betragen, sofern der Kalkulationszinssatz 0,1 % nicht unterschreitet; bei einem I_0 von 1.500.000 € mehr als 5 Jahre. Die Mindestlaufzeit der Investition für das Kriterium

der finanzmathematischen Profitabilität lässt sich folglich für die betrachtungsrelevanten Investitionssummen in Abhängigkeit des jeweiligen Kalkulationszinssatzes direkt ablesen. Dies wurde in der Abbildung 5-42 exemplarisch für das gewählte Beispiel eines r_K von 3 % und einem I_0 von 2.500.000 € mittels der rot gestrichelten Linien graphisch pointiert. Zweitens zeigt sich, dass für niedrige Investitionssummen (≤ 1.250.000 €) der Kalkulationszinssatz kaum Einfluss auf die Entscheidungsfindung hat; bei höheren I_0 besitzt r_K hingegen einen signifikanten Einfluss auf den Break-even des Kapitalwertes der Investition. Dies indiziert selbst ein Vergleich ohne die beiden extremen Kalkulationszinssätze von 0,1 % und 8 %. Werden entsprechend die realistischeren Zinssätze von 0,5 % und 5 % als obere und untere Betrachtungsschranke zugrunde gelegt, würde bei einem I_0 von 1.250.000 € lediglich eine Differenz von knapp 0,58 Jahren auftreten; bei einer Investitionssumme von 3.250.000 € bereits fast 5 Jahre. Drittens ergibt sich eine, wie bereits andiskutiert, szenarieninterne allgemeine Beziehung der folgenden Form:

- Für Beträge von $I_0 \leq$ abgezinster Zahlungsstrom in $t = 1$ resultieren unabhängig von r_K (im realistischen Bereich) und der Laufzeit ausschließlich positive Kapitalwerte. Eine Investition ist unter finanzmathematischen Gesichtspunkten uneingeschränkt vorteilhaft.
- Für Beträge von I_0 im Definitionsbereich vom abgezinsten Zahlungsstrom in $t = 1 \leq I_0 \leq$ 3.250.000 € hängt die Investitionsentscheidung sowohl von der Laufzeit als auch vom Kalkulationszinssatz ab. Der jeweilige Break-even ist der Abbildung 5-42 zu entnehmen.
- Für Beträge von $I_0 >$ 3.250.000 € ist für das gewählte Spektrum von r_K eine Laufzeit der Investition von mindestens 11 Jahren erforderlich, um einen positiven Kapitalwert zu generieren. Bei hohen Kalkulationszinssätzen (ab 5 %) beträgt die Mindestlaufzeit direkt am unteren Definitionsbereich mehr als 16 Jahre.
- Mittels der ewigen Rente (Formel 5-21) lässt sich ein von r_K abhängiges maximales I_0 ermitteln. Dieser Betrag ist nicht zu überschreiten, da selbst bei einer unendlichen Laufzeit ausschließlich negative Kaptalwerte generiert werden; eine Investition ist unter finanzmathematischen Gesichtspunkten uneingeschränkt nachteilig.

Zudem können mithilfe der Abbildung 5-42 auch die Break-evens beliebiger Zinssätze zwischen 0,1 % und 8 % für das dargestellte Spektrum von I_0 geschätzt werden.

In gleicher Art und Weise wurden die Break-evens der Kapitalwerte für die Szenarien des K_{rf}-Wertes im offenen Geltungsbereich und des $K_{rf,m}$-Wertes im geschlossenen Geltungsbereich ermittelt. Aus den Ergebnissen des dynamischen Modells ist für die Kalkulation der Einzelwerte des Szenarios um den K_{rf}-Wert des offenen Geltungsbereiches ein jährlichen Gewinn von 2.041.152,61 € bei einer auszulastenden Anlagenkapazität von 5.100 Tonnen Altmodule je Jahr als konstanter GV_t-Wert einzubringen; im Falle des geschlossenen Geltungsbereiches mit 12.500 Tonnen jährlich verfügbarer und recycelter Altmodule bei gleichzeitiger Auslegung der Recyclingkapazität ein GV_t-Wert von 5.921.035,29 €. Wie bereits dargelegt, bleibt das Spektrum der zu untersuchenden Kalkulationszinssätze szenarienübergreifend konstant. Analog der Logik für die Wahl der diskussionsrelevanten Investitionssummen im Szenario des kurzfristigen K_{rf}-Wertes wurden für die beiden ausstehenden Szenarien folgende Schranken und Schrittfolgen identifiziert:

- K_{rf}-Wert im offenen Geltungsbereich: 2.500.000 €-Schritte für die Spanne zwischen 2.500.000 € und 30.000.000 €. Zusätzlich wird ein I_0 von 1.000.000 als untere Betrachtungsschranke definiert.
- $K_{rf,m}$-Wert im geschlossenen Geltungsbereich: 5.000.000 €-Schritte in den Betrachtungsgrenzen von 5.000.000 € bis 65.000.000 €.

Die Gesamtheit aller berechneten Einzelwerte im Rahmen der gegeben Kalkulationszinssätze und in Abhängigkeit der definierten Beträge für I_0 sowie die resultierenden Break-evens der jeweiligen Kapitalwerte sind für das Szenario K_{rf}-Wert im offenen Geltungsbereich im Anhang 5-9 hinterlegt. Für das Szenario des $K_{rf,m}$-Wertes im geschlossen Geltungsbereich finden sich die zugehörigen Einzelwerte im Anhang 5-10.

Abbildung 5-43 auf der nachstehenden Seite fasst abschließend alle Ergebnisse der drei Szenarien in einem quer gedrehten Diagramm zusammen, wobei sich die Darstellung an der Abbildung 5-42 orientiert. Szenarioübergreifend wurde dieserhalb auch die jeweils den Kalkulationszinssatz von 3 % beschreibende Kurve rot hervorgehoben. Die Break-evens der Kapitalwerte, die aus dem kurzfristigen K_{rf}-Wert resultieren, bleiben bläulich gekennzeichnet; die Ergebnisse für den K_{rf}-Wert im offenen Geltungsbereich sind grün eingefärbt; die im orangenen Spektrum gehaltenen Kurven beziehen sich auf das Szenario des $K_{rf,m}$-Wertes im geschlossenen Geltungsbereich. In toto zeigt sich für jedes der drei Szenarien ein ähnliches Ergebnisbild – verschoben um die Investitionssummen und gestreckt mit wachsendem Schrittabstand.

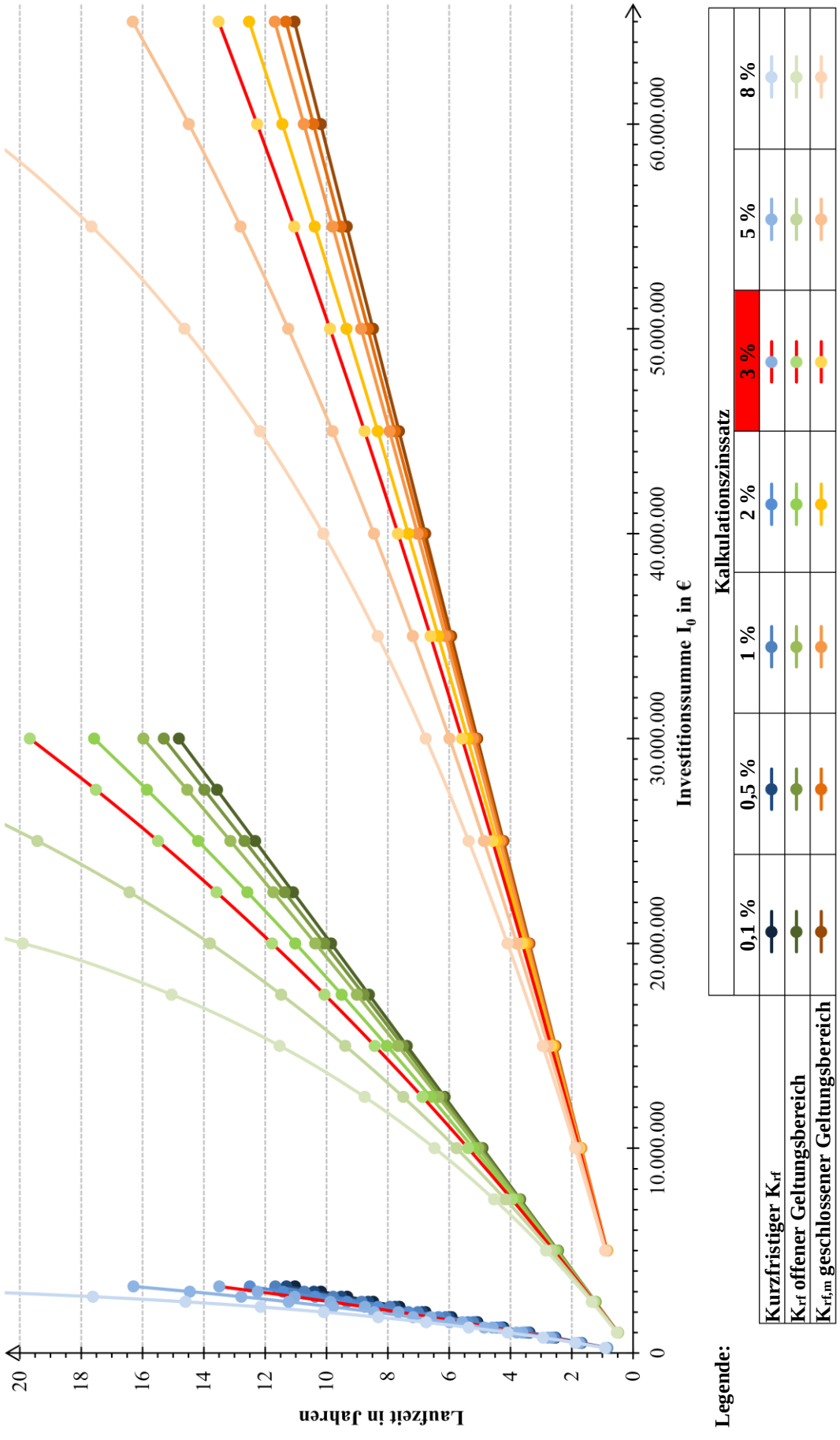


Abbildung 5-43: Break-even der Kapitalwerte aller drei Szenarien in Abhängigkeit der initialen Investitionssumme und des Kalkulationszinssatzes.

Für das Szenario K_{rf}-Wert im offenen Geltungsbereich lassen sich sonach folgende Aussagen ableiten. Übersteigt die Investitionssumme einen Wert von circa 20.300.000 € ist selbst bei dem Minimalzinssatz von 0,1 % erst nach 10 Jahren mit einem positiven Kapitalwert zu rechnen; bei einem Kalkulationszins von 3 % (rot markierte Linie der grünen Kurvenschar) reduziert sich diese Maximalsumme auf knapp 17.500.000 €. Ähnlich der vorangegangenen Diskussion zeigt sich auch für dieses Szenario, dass bei vergleichsweise (szenariointern) geringen Investitionssummen der Kalkulationszinssatz nur einen geringen Einfluss auf die Investitionsentscheidung besitzt, wohingegen r_K bei hohen Werten von I_0 erwartungsgemäß einen großen Einfluss auf die Mindestlaufzeit zeitigt. Werden wieder 0,5 % und 5 % als obere und untere Betrachtungsschranke gewählt, kann, angelehnt an die Auswertung um Abbildung 5-42, eine Differenz der Mindestlaufzeiten von maximal 0,5 Jahren bis zu einer Investitionssumme von 7.500.000 € als gegeben angesehen werden. Eine Differenz von 5 Jahren resultiert indessen bereits bei einem I_0 von knapp 22.500.0000 €. Für I_0 kleiner als der abgezinste Zahlungsstrom in t = 1 bleiben definitionsgemäß alle Kapitalwerte positiv – für diesen Spezialfall gilt eine uneingeschränkte Investitionsempfehlung. Für Investitionssummen über der ewigen Rente gilt gleichwohl eine uneingeschränkte Nachteiligkeit der Investition.

Für das Szenario des $K_{rf,m}$-Wertes im geschlossen Geltungsbereich ist indessen eine Besonderheit zu beachten. Die definierten Rahmenbedingungen sind für die betrachtete Region nach Tabelle 5-21, S. 561 maximal 14 Jahre als uneingeschränkt risikofrei anzusehen. Die Laufzeit der Investition sollte demnach diese Zeitspanne nicht überschreiten. Die zugehörige Investitionssumme ist entsprechend vom jeweiligen Kalkulationszinssatz abhängig. Am Beispiel eines r_K von 3 % wären sonach maximal 66.900.000 € anzusetzen. Für einen positiven Kapitalwert der Investition innerhalb der ersten 10 Jahre des Anlagenbetriebs stellen beim Minimalzinssatz von 0,1 % circa 59.000.000 € die Obergrenze; bei einem r_K von 3 % bereits 50.500.000 €. Zum Vergleich mit den anderen beiden Szenarien zeigt sich bei der Wahl der oberen und unteren Betrachtungsschranke von wiederum 0,5 % und 5 % bei einem I_0 von 22.500.000 € eine Differenz der Mindestlaufzeiten von maximal 0,5 Jahren zwischen beiden Investitionsmodifikationen. Erst bei einem I_0 von 65.000.000 € übersteigt die Differenz 5 Jahre. Allerdings beträgt die Maximalinvestitionssumme für eine 14-jährige Laufzeit bei einem r_K von 5 % circa 58.600.000 €. Die allgemeine Aussage, dass für I_0 kleiner als der abgezinste Zahlungs-

strom in $t = 1$ alle Kapitalwerte definitionsgemäß positiv ausfallen – eine uneingeschränkte Investitionsempfehlung gilt – bleibt auch für dieses Szenario bestehen. Anders verhält es sich mit der Aussage beziehentlich Investitionssummen oberhalb der ewigen Rente. Eine ewige Rente ist ob des geschlossenen Geltungsbereiches von 14 Jahren nicht berechenbar. Vielmehr sind initiale Investitionsausgaben, die in Abhängigkeit des jeweiligen Kalkulationszinssatzes ihren Break-even erst nach über 14 Jahren erreichen, als obere Schranke für die Vorteilhaftigkeit der Investition anzusehen.

Tabelle 5-27: Maximale Investitionssummen für einen positiven Nettogegenwartswert in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes für den Fall der ewigen Rente sowie einer geplanten Laufzeit der Investition von 10 und 5 Jahren.

Maximale I_0 in Abhängigkeit der Laufzeit		**Kalkulationszinssatz**	**Szenario**		
			kurzfristiger K_{rf}-Wert	**K_{rf}-Wert offener Geltungsbereich**	**$K_{rf,m}$-Wert geschlossener Geltungsbereich**
Geplante Laufzeit der Investition	**Ewige Rente**	**0,1 %**	296.420.350 €	2.041.152.610 €	82.276.100 €
		0,5 %	59.284.070 €	408.230.522 €	79.867.100 €
		1 %	29.642.035 €	204.115.261 €	76.995.300 €
		2 %	14.821.018 €	102.057.631 €	71.681.500 €
		3 %	9.880.678 €	68.038.420 €	66.884.500 €
		5 %	5.928.407 €	40.823.052 €	58.610.200 €
		8 %	3.705.254 €	25.514.408 €	48.814.500 €
	10 Jahre	**0,1 %**	2.948.000 €	20.299.700 €	58.886.000 €
		0,5 %	2.884.300 €	19.861.250 €	57.614.100 €
		1 %	2.807.500 €	19.332.400 €	56.079.930 €
		2 %	2.662.600 €	18.334.800 €	53.186.200 €
		3 %	2.528.500 €	17.411.450 €	50.507.600 €
		5 %	2.288.900 €	15.761.200 €	45.720.700 €
		8 %	1.989.000 €	13.696.300 €	39.730.600 €
	5 Jahre	**0,1 %**	1.477.700 €	10.175.200 €	29.516.550 €
		0,5 %	1.460.150 €	10.054.450 €	29.166.250 €
		1 %	1.438.650 €	9.906.600 €	28.737.350 €
		2 %	1.397.200 €	9.620.900 €	27.908.560 €
		3 %	1.357.500 €	9.347.900 €	27.116.610 €
		5 %	1.283.350 €	8.837.130 €	25.635.000 €
		8 %	1.183.500 €	8.149.700 €	23.641.000 €

Es gelten 14 Jahre als maximale Investitionslaufzeit

Tabelle 5-27 auf der vorangegangenen Seite stellt für alle drei Szenarien die maximalen Investitionssummen gegenüber, die in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes bei einer unendlichen Laufzeit (ewige Rente) sowie einer geplanten Laufzeit der Investition von 10 und 5 Jahren als Grenzfälle einen positiven Nettogegenwartswert generieren. Zu beachten bleibt dabei, dass im Falle des Szenarios $K_{rf,m}$-Wert im geschlossen Geltungsbereich per Definition die ewige Rente durch eine maximale Investitionslaufzeit von 14 Jahren substituiert wird. Abgesehen von dieser Sonderheit lässt sich aus dieser Gegenüberstellung folgende Beziehung ableiten. Bei der Planung einer Recyclinganlage$_{VR}$ in der betrachteten Region kann bei einer Erhöhung der Auslegung der Anlagenkapazität und deren vollausgelastetem Betrieb von 1.450 t kristalliner Siliziumsolaraltmodule je Jahr auf jährlich 5.100 t (Erweiterung um 250 %) die initiale Investitionssumme bei sonst gleichen Rahmenbedingungen rund 6,89 mal so hoch ausfallen, damit sich innerhalb der angestrebten Zeitspanne ein positiver Kapitalwert ergibt. Diese Divergenz ist grundsätzlich auf die bereits im Kapitel 5.4.3.1 identifizierten Skaleneffekte zur Reduktion der Verfahrenskosten mit steigender Anlagenkapazität zurückzuführen. Durch sinkende Verfahrenskosten je behandeltem Altmodul steigt der dem Arbeitspunkt zugehörige *GV*-Wert, was sich letztlich in einer Erhöhung der potenziellen Maximalinvestitionssumme zur Generierung eines positiven Kapitalwertes äußert. Ein ähnliches Bild ergibt sich beim Vergleich der Werte der beiden Szenarien K_{rf}-Wert im offenen Geltungsbereich und $K_{rf,m}$-Wert des geschlossen Geltungsbereiches. Eine Erhöhung des Arbeitspunktes um 145 % von 5.100 t je Jahr auf jährlich 12.500 t würde bei gleichem Kalkulationszins die maximale Investitionssumme für eine festgelegte Investitionslaufzeit um 190 % wachsen lassen. Die geringere Differenz zwischen dem höheren Arbeitspunkt und der maximalen Investitionssumme beider Vergleiche liegt in den sinkenden Werten des streng monoton wachsenden Anstiegs der Verfahrenskosten begründet. Weiter resultiert aus einer Erhöhung des Arbeitspunktes von 1.450 t je Jahr auf jährlich 12.500 t (Zuwachs um 762 %) eine Erhöhung des maximalen Investitionsbetrages bei sonst gleichen Rahmenbedingungen um 1.897 %. Aus rein mathematischer Perspektive können diese Zuwächse auch aus der Multiplikation der Zuwächse zwischen den Szenarien kurzfristiger K_{rf}-Wert und K_{rf}-Wert im offenen Geltungsbereichs sowie K_{rf}-Wert im offenen Geltungsbereich und $K_{rf,m}$-Wert im geschlossenen Geltungsbereich berechnet werden. Die Deckungsgleichheit der resultierenden prozentualen Zuwächse bei allen Werten der Tabelle 5-27 lässt auf die Konsistenz der Berechnungen aller szenarienspezifischen Break-evens der Kapitalwerte schließen.

5.4.6 Ergebnisanalyse

Obschon in den regionalen Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters bereits im Szenario des kurzfristigen K_{rf}-Wertes die verfügbaren Altmodulmengen rund 3-mal so hoch sind, wie zur Überschreitung der Gewinnschwelle erforderlich, ist der mittels eines hochwertigen $\text{Recycling}_{\text{VR}}$ potenziell jährlich zu erwirtschaftende Gewinn zu niedrig, um für entsprechende initiale Investitionssummen innerhalb eines adäquaten Planungshorizontes einen positiven Nettogegenwartswert der Investition zu effizieren. Ein aus dem dynamischen Modell hervorgegangener annueller Gewinn von 296.420 € (vgl. Kapitel 5.4.5.2) würde bei einem Kalkulationszinssatz von 3 % eine maximale Investitionssumme von 9.880.678 € als ewige Rente bedingen. Wenngleich dieser Betrag für die Errichtung einer Recyclinganlage inklusive Maschinenkauf, Investition in Gebäude und Infrastruktur, Planungskosten et cetera bereits als niedrig anzusehen ist, stellt das Konzept der ewigen Rente keinen sinnvollen Planungshorizont dar. Nach Tabelle 5-27 ergibt sich für einen überschaubaren Planungshorizont von 10 Jahren ein Maximalwert von nur 2.528.500 €, bei einem realistischen Vergleichszeitraum der Investition von 5 Jahren sogar lediglich 1.357.500 €. Bei umgekehrter Betrachtungsweise bedarf folglich eine Investitionssumme von 2.500.000 € bei einem r_K von 3 % einen Planungshorizont von mindestens 10 Jahren. Wird im Zuge einer theoretischen Überprüfung ein idealisierter Kalkulationszins von 0 % zugrunde gelegt, würde sich ein Break-even des Kapitalwertes für eine Laufzeit der Investition von 10 Jahren bei 2.964.204 € ergeben; für eine Laufzeit von 5 Jahren bei genau der Hälfte zu 1.482.102 €. Es ist davon auszugehen, dass eine initiale Investitionssumme höher als diese beiden idealisierten und rein theoretischen Werte notwendig ist, was einen negativen Kapitalwert der Investition zur Folge hätte. Dies stellt aus finanzmathematischer Perspektive eine stringente Erklärung für die gegenwärtige Disproportionalität zwischen dem Stand der zur Verfügung stehenden hochwertigen verfahrenstechnischen Lösungsansätze und deren industriellen Anwendung dar – für die kurzfristige Planungsphase existiert innerhalb der regionalen Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters ein Hemmnisfaktor in Form einer ökonomischen Restriktion.

Im Falle des Szenarios K_{rf}-Wert im offenen Geltungsbereich liegen die möglichen maximalen Investitionssummen rund 6,89-mal so hoch wie für das Szenario des kurzfristigen K_{rf}-Wertes. Sollten Investitionssummen, wie sie in der Tabelle 5-27 für den entsprechenden Planungshorizont ausgewiesen sind, realistische Werte darstellen, wäre

eine Initiierung einer Recyclingaktivität$_{VR}$ mit einem Arbeitspunkt von jährlich 5.100 t ab dem Jahr 2036 denkbar und würde positive Kapitalwerte generieren. Laut Tabelle 5-22 (Kapitel 5.4.4.3, Seite 563) ist im zugrunde liegenden Einzugsgebiet unter gegebenen Rahmenbedingungen jedoch nur der Betrieb einer einzelnen Anlage ohne das Risiko von Versorgungsengpässen möglich. Erst im geschlossen Geltungsbereich könnten zwei Anlagen dieser Auslegung betrieben werden. Zeigt sich hingegen, dass auch diese Investitionssummen zu niedrig für eine Anlage mit einem Arbeitspunkt von 5.100 t je Jahr sind, wäre entweder frühestens im Jahr 2040, mit dem Eintreten des geschlossenen Geltungsbereiches, ein Betrieb einer Recyclingaktivität mit einem Arbeitspunkt von 12.500 t möglich, oder das Einzugsgebiet müsste mindestens auf die Region Sachsen samt deutschseitiger Anrainer erweitert werden. Im letztgenannten Fall sind allerdings wiederum die Sammel- und Transportkosten neu zu kalkulieren. In diesem Zuge müsste auch die Standortoptimierung angepasst werden.

Des Weiteren ist zu beachten, dass ob des volatilen Herstellermarktes kurzfristige Werksschließungen jederzeit imponderabel und desultorisch auftreten können. Solche Ereignisse können einen großen Einfluss auf die grundlegenden Gegebenheiten der kurzfristigen Planungsphase zeitigen. Allerdings spielen solche Effekte mit dem Eintreten der Massenströme ab dem Jahr 2028 nur eine untergeordnete Rolle, da der Anteil am Gesamtstrom regional verfügbarer Altmodule auf unter 10 % sinkt. In toto zeigt sich, dass die Investition in die Initiierung einer Recyclingaktivität$_{VR}$ mit einem adäquaten Arbeitspunkt in den regionalen Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters am optimalen Standort R19 nicht vor dem Jahr 2036 finanzmathematisch sinnvoll erscheint – sofern sich keine fundamentalen Änderungen in der Kostenstruktur oder den erzielbaren Gewinnen ergeben. Aus der Diskussion des Kapitels 5.4.2.1 ab Seite 515ff zeigt sich jedoch genau ein solches Potenzial: der Betrieb einer Recyclingaktivität$_{VN}$.

Demnach kann der Erlös, der mittels eines hochwertigen Recycling zur Verwendung generiert werden kann, circa 3,2-mal höher ausfallen als für das Recycling$_{VR}$. Wenngleich sich mit der Einführung des Sicherheitsfaktors S_E die absoluten Beträge von 55 € je gSSM$_{alt}$ im Falle des Recyclings zur Verwendung und 17,20 € für das Recycling zur Verwertung auf 41,25 € respektive 12,90 € je gSSM$_{alt}$ reduzieren, bleibt deren Verhältnis unberührt. Dies würde in gleichem Maße für die Einflüsse des Minderungsfaktors F_a gelten, obschon dieser alleinig auf ein Recycling$_{VN}$ wirkt. Grund ist, dass dieser bei einem Recycling$_{VN}$ sowohl die Erlös- als auch die Kostenseite beeinflusst, welche ex aequo auf

der Bezugsgröße x basieren; F_a mindert sonach den gesamten aktivitätsspezifischen Input. Wird eine Parität der periodisierten Kosten und Erlöse nach Formel 5-12 unterstellt und zudem angenommen, dass sich für beide Recyclingformen identische Transportkosten bei sonst gleichen Rahmenbedingungen (Einzugsgebiet, Standort, Bezugsmenge, Fuhrpark et cetera) ergeben, könnten mit den erzielbaren Erlösen aus dem $\text{Recycling}_{\text{VN}}$ von gSSM_{alt} der Menge x auch 3,2-fach höhere aktivitätsspezifische Verfahrenskosten, verglichen zum $\text{Recycling}_{\text{VR}}$, gedeckt werden. Aus den Betrachtungen zu den Recyclingtechnologien wird jedoch deutlich, dass die Verfahrenskosten ähnliche Dimensionen aufweisen; ein Faktor 3,2 in den Verfahrenskosten zwischen einem $\text{Recycling}_{\text{VN}}$ und einem $\text{Recycling}_{\text{VR}}$ ist faktisch auszuschließen. Es kann sonach geschlussfolgert werden, dass die Parität von Kosten und Erlösen – das Erreichen der Gewinnschwelle – im Falle des $\text{Recycling}_{\text{VN}}$ mit einer geringeren Menge jährlich anfallender Altmodule möglich ist, beziehungsweise dass bei Überschreitung der Gewinnschwelle für ein $\text{Recycling}_{\text{VN}}$ der Gewinn um den Faktor 3,2 (gemindert um die reale Differenz der Verfahrenskosten) höher liegt als beim $\text{Recycling}_{\text{VR}}$. Daraus resultieren folglich vollkommen andere Voraussetzungen für potenzielle Investitionen. Folgende Beispiele sollen dies nun exemplarisch für einen fixierten Kalkulationszinssatz von 3 % substanziieren:

- Für das Szenario des kurzfristigen K_{rf}-Wertes würde sich bei einer Investitionssumme von 3.000.000 € der Break-even des Kapitalwertes von 12,24 Jahren auf rund 3,38 Jahre reduzieren. Mit Blick auf eine maximale Laufzeit der Investition von 5 Jahren würde sich die maximal mögliche Investitionssumme bei gleichem Kalkulationszinssatz von 1.357.500 € auf knapp 4.344.050 € erhöhen.
- Wird das Szenario des K_{rf}-Wertes im offenen Geltungsbereich zugrunde gelegt, würde sich der Break-even des Kapitalwertes bei beispielshalber 20.000.000 € Investitionssumme von 11,78 Jahren auf 3,26 Jahre verringern. Soll die Laufzeit der Investition wiederum 5 Jahre betragen, erhöht sich die maximal mögliche Investitionssumme von 9.347.900 € auf rund 29.913.200 €.
- Für das Szenario $K_{rf,m}$-Wert im geschlossen Geltungsbereich reduziert sich die Mindestlaufzeit der Investition bei einem I_0 = 50.000.000 € von 9,88 Jahren auf 2,79 Jahre. Analog der beiden vorangegangenen Listenpunkte könnte bei einer fünfjährigen Laufzeit der Investition das maximale I_0 von 27.116.610 € auf 86.773.150 € ansteigen.

Die enormen Differenzen in den abgegebenen szenarienspezifischen Grenzwerten machen das Potenzial eines $Recycling_{VN}$ deutlich. Der gesamten bisherigen Diskussion folgend, scheint der Ansatz des Recyclings zur Verwendung demnach das Recycling zur Verwertung sowohl ökologisch als auch ökonomisch zu dominieren. Da jedoch die gegenwärtige Disproportionalität zwischen dem Stand der zur Verfügung stehenden hochwertigen verfahrenstechnischen Lösungsansätze und deren industriellen Anwendung auch ein $Recycling_{VN}$ einbegreift – unabhängig von der Form kein hochwertiges Recycling betrieben wird – ist dies im Gros auf zwei Möglichkeiten zurückzuführen. Entweder sind die potenziellen annuellen Gewinne aus einem $Recycling_{VN}$ im Verhältnis zur initialen Investitionssumme bislang weiterhin zu niedrig. Dies kann sowohl aus zu hohen Kosten als auch zu niedrigen Erlösen, zu geringen Altmodulaufkommen oder zu hohen benötigten Investitionssummen resultieren. Oder es ergeben sich für potenzielle Recycler andere Restriktionen, die die ökonomische Vorteilhaftigkeit in solch einem Maße beeinflussen, dass das $Recycling_{VN}$ nur scheinbar das $Recycling_{VR}$ dominiert. Diese Restriktionen äußern sich zum Beispiel in Risiken, die mit der steten Weiterentwicklung der kristallinen Siliziumsolartechnologie verbunden sind. Einen ersten Ansatz dazu liefert [Weckend 2016, Seite 87]: „Additional R&D and optimisation of recycling processes will be required to realise the full potential of material recovery, especially considering previous and current panel designs not yet incorporated into designs for recycling."

Besonders was die Handhabbarkeit immer dünnerer Siliziumsolarwafer oder anstehende Materialsubstitutionen betrifft, unterliegt die Profitabilität einer $Recyclingaktivität_{VN}$ stärkeren Risiken als die eines $Recycling_{VR}$. Anstehende Materialsubstitutionen beziehen sich in diesem Zusammenhang nicht nur auf stoffliche Modifikationen, vielmehr entsteht eine Diskrepanz zwischen den Anforderungen an das Abmaß moderner Siliziumsolarmodule und den Abmaßen anfallender Altmodule. Ein $Recycling_{VN}$ unterliegt hier ungleich höheren Risiken als ein $Recycling_{VR}$, da der Prozessoutput wesentlich enger gefassten Spezifikationen des potenziellen Absatzmarktes gerecht werden und sich gegebenenfalls an veränderte Anforderungen anpassen muss. Solche Risiken sollen nun Gegenstand des nachfolgenden Kapitels sein. Ein zentraler Aspekt des subsekutiven Kapitels 5.5 kommt dieserhalb der Diskussion solcher Einflüsse und Effekte zu, wobei gezielt sowohl potenzielle Risiken als auch Chancen, die mit jener steten Technologieentwicklung einhergehen, adressiert werden.

5.5 Konstruktionsbedingte Beeinflussungen der ökonomischen Aspekte

Der im vorangegangenen Kapitel identifizierte gegenwärtige Hemmnisfaktor für die Initiierung einer hochwertigen Recyclingaktivität zur Verwertung in den Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters kann infolge konstruktionsbedingter Anpassungsmaßnahmen indessen auch abgemildert werden. Dies betrifft etwaige Modifikationen des Moduldesigns und einzelner Komponenten sowie die Nutzung fortschrittlicher Fertigungstechnologien und den damit einhergehenden Einsatz von neueren Zellenkonzepten, wie die im Kapitel 3.3.4 beschriebenen Hocheffizienzzellen. Allerdings kann dies auch negative Auswirkungen zeitigen, welche sich in Hinblick auf das $\text{Recycling}_{\text{VR}}$ und das $\text{Recycling}_{\text{VN}}$ sowohl in der Verstärkung potenzieller ökonomischer Risiken als auch in der Generierung zusätzlicher Hemmnisfaktoren äußern können. Wie am Beispiel der „Buried-Contact-Cell“ deutlich wird, steht dabei nicht nur die Substitution einzelner Materialien sondern auch die Art deren Verarbeitung im Fokus. Von essentieller Bedeutung für diesen Betrachtungsgegenstand ist dabei die gezielte Unterteilung nach der Art des Recyclings. Dies soll indessen nicht mithilfe einer thematischen Trennung des Kapitels in ein Recycling zur Verwendung und ein Recycling zur Verwertung erfolgen, vielmehr werden alle möglichen betrachtungsrelevanten Aspekte für beide Recyclingformen in den entsprechenden Unterkapiteln separat bewertet.

5.5.1 Recyclingorientiertes Moduldesign

Wird bereits während der Produktdesignphase der Aspekt des Recyclings mit beachtet, kann dies positive Auswirkungen sowohl auf die notwendigen verfahrenstechnischen Kosten des Recyclings zur Erzeugung der Outputfraktionen als auch auf die erzielbaren Einzelerlöse aus der Veräußerung der Sekundärrohstoffe zeitigen. Im Falle kristalliner Siliziumsolarmodule besteht allerdings eine Diskrepanz zwischen der gewünschten Langlebigkeit, welche unabhängig vom Ort der Installation und dem dort vorherrschenden Portfolio an Umwelteinflüssen garantiert wird, und einer recyclingfreundlichen Demontierbarkeit der einzelnen Komponenten. Wie bereits im Kapitel 4.5.5: „Fertigung Standardsolarmodul“ beschrieben, werden die einzelnen Solarzellen eines kristallinen Standardsiliziumsolarmoduls mittels einer dreidimensionalen Vernetzung

der EVA-Schichten sowohl vor Umwelteinflüssen geschützt, als auch im Verbund fixiert. Diese Handhabe stellt den industriellen Fertigungsstandard dieser Technologie dar. Speziell die dreidimensionale Vernetzung infolge des Prozessschrittes der Laminierung hat zur Konsequenz, dass das Modul nicht schadfrei in seine einzelnen Komponenten zerlegbar ist; die technischen Möglichkeiten und die daraus resultierenden Fraktionen wurden im Kapitel 5.3 diskutiert. Die Laminierung des Modulverbundes bettet jedoch nicht nur die Solarzellen ein, der Fertigungsschritt führt auch dazu, dass Frontglas und Rückseitenfolie in einem festen Materialverbund vorliegen. Daraus ergibt sich ein Widerspruch zur geforderten Produktkonzeption mit Blick auf eine erleichterte Demontage, Wiederverwendung und Verwertung von Altgeräten nach § 4 Absatz 1 des ElektroG2, wie bereits im Kapitel 5.1.2 angedeutet. Allerdings zeigen sich auf Seiten der Modulhersteller mittlerweile erste Überlegungen hin zu einer recyclingorientierten Produktgestaltung. In [Auer 2015, S. 40f] gaben 17 von 20 befragten Herstellern an, dass Solarmodule ein recyclingorientiertes Design aufweisen sollten. Als Gründe werden besonders die damit einhergehenden energetischen Einsparungen zur Neuproduktion hochreinen Siliziums (ökologischer und ökonomischer Nutzen), ein positiver Einfluss auf das Firmenimage und die Reduktion der Produktionskosten ob der Begünstigung des $\text{Recycling}_{\text{VN}}$ genannt. Wenngleich diese Ergebnisse jedoch nicht uneingeschränkt auf die Gesamtheit der Modulhersteller zu übertragen sind, zeigen sie, dass die Thematik der Produktgestaltung zur Vereinfachung der Recyclingmaßnahmen zumindest gedanklich bereits Beachtung findet.

Wie aber lässt sich ein recyclingorientiertes Moduldesign überhaupt realisieren und wie wirkt es sich schließlich auf das Recycling aus? Warum werden derzeit keine technischen Maßnahmen umgesetzt? Resultieren womöglich negative Folgen für den Anlagenbetrieb?

Eine Möglichkeit ist die generelle Anpassung des Modullayouts. In der gängigen Literatur sind diesbezüglich vor allem die Einführung einer sogenannten Sandwichstruktur, die Modifikation der Modulrahmung und die Substitution des Verkapselungsmaterials prominente Vertreter.

5.5.1.1 Einsatz von Zwischenfolien

Unter einer Sandwichstruktur wird in diesem Zusammenhang die Einbringung von Folien zwischen die EVA-Schichten und die kristallinen Siliziumsolarzellen verstanden, wobei die beiden zusätzlichen Folien je Zelle geringfügig größere Kantenabmessungen aufweisen. Hierdurch werden zwar die Zwischenfolien bei der Laminierung mit der jeweiligen EVA-Schicht vernetzt, die dazwischenliegenden Solarzellen bleiben jedoch von der Vernetzung unberührt. Dies soll die schadfreie Vereinzelung der Solarzellen beim Recyclingprozess erleichtern. Laut [Sanchez-Friera *et al.* 2004] in: [Fischer *et al.* 2012, S. 24] und [Sander *et al.* 2007, S. 51] sollen so sogar einzelne defekte Solarzellen eines Modulverbundes gezielt austauschbar werden. Infolge der Einbringung einer Zwischenschicht verlieren die Solarzellen allerdings an mechanischer Stabilität, da sie nicht fest vernetzt vorliegen. Dies betrifft besonders das Verrutschen durch Erschütterungen sowie eine erhöhte Bruchgefahr. Gleichwohl würde eine Umsetzung dieser Designvariable den Wirkungsgrad eines Moduls senken, da eine zusätzliche Grenzschicht auf der beleuchteten Zellenseite einen Teil der auftreffenden Strahlung reflektieren würde (vgl. hierzu Kapitel 2.5: „Lichtabsorption“). Der zumindest theoretisch positive Effekt für die Demontage im Sinne eines Recyclings zur Verwendung infolge der potenziellen Senkung der Bruchraten bei der Extraktion der Solarzellen wurde bisher im Sinne eines Recyclings zur Verwertung nicht untersucht. Dieser kann sich bei der stofflichen Trennung sowohl positiv auf die Verschmutzung des Solarzellenbruchs auswirken, kann aber auch infolge der zusätzlichen stofflichen Komponente imponderable negative Effekte im Gesamtprozess zeitigen. Ob die Verwendung dieser Zwischenfolien einen positiven oder negativen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit potenzieller Recyclingaktivitäten hat, ist dementsprechend schwierig auszumachen. Der entscheidende Grund, warum dieser Ansatz keine Anwendung in der Produktion findet, lässt sich auf den dadurch bedingten geringeren Wirkungsgrad der Module verbunden mit erhöhten Produktionskosten sowie die sinkende mechanische Stabilität zurückführen.

5.5.1.2 Modifikation der Modulrahmung

Eine weitere Möglichkeit ist die Modifikation der Modulrahmung. Obschon eine Vielzahl potenzieller Ansätze existiert, wird nachstehend nur auf die bedeutendsten und in der gängigen Fachliteratur am häufigsten aufgegriffenen Beispiele eingegangen. An erster Stelle ist dabei die Verwendung von Metallen mit einem wärmegebundenen Form-

gedächtnis zur Verschraubung der Rahmung zu nennen. Dies soll speziell die Demontage der Modulrahmung erleichtern, indem die eingesetzten Schrauben infolge einer Erwärmung ihre Gewindestruktur ob deren Wärmegedächtnisses verlieren und so die Verschraubung gelöst wird. [Sander *et al.* 2007, S. 51]; [Fischer *et al.* 2012, S. 24]; [Behrendt *et al.* 2010, S. 98] Ein anderer prominenter Ansatz ist die Substitution der Aluminiumrahmung durch einen von hinten aufgeklebten Rahmen aus Stahl. Laut [Behrendt *et al.* 2010, S. 97] könnte dadurch sowohl der Materialbedarf zur Produktion gesenkt, als auch die Demontage erleichtert werden. Allerdings lassen sich laut [Sander *et al.* 2004, S. 60] lediglich verschraubte Rahmungen vor dem ersten Behandlungsschritt separieren. Ähnlich der Verwendung von Schrauben mit einem Formgedächtnis können jedoch neuartige Klebemittel bereits mittels einer gemäßigten Wärme- oder Kältezufuhr bereits gelöst werden. Der Vorteil beider Variante ergäbe sich sonach aus der vereinfachten Entfernung der Modulrahmung und deren direkter (nach einem Reinigungsschritt) Wiederverwendung. Dies würde neben der Reduktion der Verfahrenskosten einer Recyclingaktivität auch die Produktionskosten positiv beeinflussen, sofern dieses Potenzial in die Produktion von kristallinen Siliziumsolarmodulen einfließt. Allerdings können sich aus dieser Modifikation der Modulrahmung und der daraus resultierenden manuellen Demontagemöglichkeit während des Recyclings auch negative Auswirkungen wie beispielshalber eine erhöhte Gefahr des gezielten Diebstahls dieser Modulkomponente oder des gesamten Moduls ergeben. Zudem steigen die Produktionskosten für ein Modul mit wärmeabhängigem Formgedächtnis für die Verschraubung der Rahmung, sollten diese nicht branchenintern rezykliert werden. Generell ist aus Sicht der leichteren und schadfreien Demontage eine Verschraubung einer Verklebung jedoch vorzuziehen.

Eine weitere Alternative, welche sogar bereits Einzug in die kommerzielle Produktion gefunden hat, ist die Fertigung rahmenloser Module. Dies geht hauptsächlich auf die Einsparung der Materialkosten während der Produktion zurück. Allerdings liegt der Marktanteil rahmenloser kristalliner Siliziumsolarmodule laut [Cellere *et al.* 2016, S. 35] bei nur rund 5 %. Mit Blick auf das Recycling kann dieses Modulkonzept zwar eine Reduktion der Verfahrenskosten zeitigen, die potenziellen Gesamterlöse aus dem Absatz aller Outputfraktionen würden jedoch um den Beitrag der Rahmung sinken. Ferner ist in diesem Zusammenhang der Effekt der Erlösminderung stärker einzuschätzen als die potenzielle Reduktion der Verfahrenskosten für das Recycling. Dies liegt darin begründet, als dass der Anteil dieser spezifischen Outputfraktion am Gesamterlös bei

einem $Recycling_{VN}$ rund 14,54 % und bei einem $Recycling_{VR}$ circa 23,78 % beträgt (vergleich Tabelle 5-16 und Tabelle 5-17, Kapitel 5.4.2.1), wobei der niedrigere Anteil bei einem $Recyckling_{VN}$ aus dem hohen Beitrag der Veräußerung zurückgewonnener kristalliner Siliziumsolarwafer resultiert.

Alle drei Varianten erleichtern zwar die Demontage der Rahmung (sofern vorhanden), lösen aber nicht das Hauptproblem der notwendigen festen Vernetzung aller weiteren Komponenten.

5.5.1.3 Substitution des Verkapselungsmaterials

Hauptaspekt dieses Unterkapitels ist ausschließlich die Substitution des Verkapselungsmaterials, um während des Recyclings auf den Prozessschritt der Verbrennung oder Pyrolyse zu verzichten und eine gänzlich stoffliche Rückführung zu ermöglichen. Eine Variante ist die Nutzung von Thermoplasten, speziell thermoplastischen Elastomeren auf Olefinbasis (TPO). Diese besitzen den Vorteil, dass sie sich bei Wärmezufuhr verformen lassen. Je nach der Höhe der Wärmezufuhr verändert das TPO seine Viskosität, bis schließlich die Zersetzungstemperatur erreicht ist. In Abhängigkeit des Temperaturprofils können sonach die Rückseitenfolie, das Frontglas und die Zellen mechanisch voneinander getrennt werden. Allerdings ist zur Reinigung der Solarzellen vom Verkapselungsmaterial wiederum eine Pyrolyse notwendig. [Goris *et al.* 2015] Dadurch können zwar die Bruchraten verglichen zur Pyrolyse des gesamten Materialverbundes gesenkt werden[169], eine stoffliche Rückführung aller Komponenten wird letztlich trotzdem nicht erreicht. Ferner ergeben sich Risiken bei Defektarten, die beispielsweise Hot Spots sowie eine überbordente punktuelle oder flächige Erhitzung innerhalb des Modulverbundes nach sich ziehen. Laut [Cellere *et al.* 2016, S. 16] ist zudem in den nächsten Jahren nur mit einem geringen Produktionsvolumen von kristallinen Siliziumsolarmodulen mit TPO als Verkapselungsmaterial zu rechnen.

Ein weiteres Konzept ist die kunststofffreie Verkapselung. Der grundlegende Modulaufbau gleicht einem bifacialen Solarmodul mit einer Front- und einer Rückverglasung, jedoch ohne die zugehörigen EVA-Schichten. Die Glasscheiben werden mittels Vakuum zusammengehalten und drücken dabei die kupferhaltigen Zellenverbinder auf die

[169] Die Senkung der Bruchrate verglichen zur Pyrolyse des gesamten Materialverbundes geht darauf zurück, dass die Zellen zur Zufuhr in den Pyrolyseofen auf eine alternative Weise auf einen Träger befestigt werden, weshalb keine Verspannungen durch Pyrolysegase zwischen der Zelle und der Frontscheibe entstehen.

einzelnen Solarzellen. Einzig eine Randversiegelung wird genutzt, um das Eindringen von Feuchtigkeit, Luft und sonstigen Partikeln zu unterbinden. Laut [Dupuis *et al.* 2012] zeigt dieses Moduldesign selbst unter Standardtestbedingungen gute Ergebnisse. Allerdings handelt es sich dabei um eine firmeneigene Studie, weshalb weitere Untersuchungen notwendig sind. Obschon dieser Ansatz für ein potenzielles Recycling viele Vorteile mit sich bringt, scheinen die negativen Auswirkungen auf die Langlebigkeit des Produktes eine Marktdurchdringung zu verhindern. Besonders kritisch ist in diesem Zusammenhang die totale Abhängigkeit der Funktionstüchtigkeit des Moduls und sicherheitsrelevanter Aspekte von der Integrität der Verglasung und der Randversiegelung zu sehen. Neben dem Verlust des Vakuums und damit der mechanischen Stabilität können Feuchtigkeit, Luft und sonstige Partikel in den Materialverbund eindringen und nicht zuletzt sicherheitsrelevanten Schaden anrichten. Wie bereits erwähnt, würde ein solches Moduldesign jedoch zahlreiche Vorteile für ein Recycling mit sich bringen – besonders hinsichtlich eines $Recycling_{VN}$. Unabhängig der Recyclingform entfällt die Pyrolyse inklusiver der notwendigen Sekundärmaßnahme sowohl zur Auftrennung des Modulverbundes als auch zur Reinigung der Zellen (bei Verwendung von TPO), was enorme Einsparungen bei den verfahrenstechnischen Kosten bedeutet. Zudem würde keine Erlösminderung auftreten, da keine vermarktungsfähige Outputfraktion aus dem Recyclingprozess entfällt (falls eine Modulrahmung vorhanden ist).

In toto entspricht aus Sicht eines ökologisch sinnvollen und hochwertigen Recyclingansatzes dieses Konzept einem recyclingorientierten Produktdesign. Sollte eine Modulrahmung angedacht sein, wäre in diesem Zusammenhang zudem die Verwendung von Schrauben mit einem wärmeabhängigen Formgedächtnis (vergleich Kapitel 5.5.1.2) wünschenswert.

5.5.1.4 Regionalspezifische Modulkonzeption

Einen weiteren Ansatzpunkt stellt eine regionalspezifische Produktkonzeption dar. Dies geht auf die Überlegung zurück, ob kristalline Siliziumsolarmodule so konzipiert sein müssen, dass sie selbst bei Einsatz in den gemäßigten Klimazonen den globalen Extremen zu trotzen vermögen müssen. Standardmäßig ist jedoch genau dies der Fall. Kristalline Siliziumsolarmodule werden unabhängig ihres potenziellen Einsatzortes konstruiert. Gleiches gilt für die zugrunde liegenden Prüfverfahren. Laut der IEC 61215 muss ein $gSSM_{sc/mc}$ beispielshalber Temperaturschwankungen zwischen -40 °C und 85 °C bei

einer relativen Luftfeuchte von 85 % schadfrei überstehen. Hierfür ist der Laminierungsschritt der einzelnen Modulkomponenten notwendig. Module, die speziell für den Einsatz in den gemäßigten Klimazonen produziert würden, könnten andere Verkapselungsmaßnahmen nutzen, welche eine leichtere und nicht thermische Zerlegung zeitigen könnten – bei weiterhin ausreichender Widerstandsfähigkeit gegenüber des regionalspezifischen Portfolios klimatischer Extremereignisse.

Mit Blick auf das Recycling würden sich aus solch einem Ansatz neben den bereits aufgeführten positiven Effekten indessen auch negative Aspekte ergeben. So würde die Produktvielfallt, die bereits jetzt problematische Ausmaße für potenzielle Recycler von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen erreicht, nahezu multiplikativ um die Anzahl definierter regionaler Cluster charakteristischer Installationsstätten weiter steigen. Etwaige negative Effekte stellen sich natürlich umso prekärer dar, je spezialisierter die zugrunde liegende Verfahrenstechnik einer Recyclingaktivität ist. Sonach würden sich folglich für Recycler, die auf ein regionalspezifisches Moduldesign spezialisiert wären, unter Umständen Potenziale zur Senkung der Verfahrenskosten ergeben; bei einem generellen Ansatz würden jedoch die negativen Effekte dominieren. Entweder zeitigt ein von der Region der Installationsstätte abhängiges Moduldesign an die Verfahrenstechnik eines generellen Recyclingansatzes enorme zusätzliche Anforderungen oder die Quantität des verfügbaren Prozessinputs würde sich entsprechend verringern. Es ergibt sich folglich ein Spannungsfeld zwischen diesem Ansatz zur Gestaltung eines recyclingorientierten Modulkonzeptes und der benötigten Uniformität der PV-Module hinsichtlich betriebswirtschaftlich lohnender Prozesse.

Unabhängig der Art der Modifikation des Moduldesigns bezüglich eines recyclingorientierten Konzeptes müssen etwaige Maßnahmen trotz aller potenziellen Vorteile für ein Recycling auch entsprechende Synergien zur existierenden Infrastruktur der Produktion besitzen, da eine Anpassung der Produktionsprozesse realiter als unwahrscheinlich anzusehen ist. Es ist dementsprechend eine Abstimmung der Prozesse zwischen Produzenten und möglichen Recyclern notwendig, um einen beidseitigen Nutzen ob des systemischen Kostenreduktionspotenzials grundsätzlich effizieren zu können.

5.5.2 Potenzielle Materialsubstitutionen und Reduktion spezifischer Ingredienzien

Neben der gezielten Modifikation des Moduldesigns kann sich auch die Substitution einzelner Ingredienzien eines kristallinen Siliziumsolarmoduls auf die Gewinnschwelle einer Recyclingaktivität auswirken. In den meisten Fällen ist bei einer reinen Substitution einzelner Ingredienzien jedoch von einer negativen Beeinflussung auszugehen, da dies zumeist produktionsgetriebene Entscheidungen zur Senkung der Herstellungskosten sind. Demnach stellt der Austausch ökonomisch werthaltiger Materialien gegen billigere (monetär) den hauptsächlichen Stimulus – im Gegensatz zu einem recyclingorientierten oder ökologisch getriebenen Movens. Gleiches trifft auf die Reduktion spezifischer Ingredienzien zu, wobei hier ebenfalls zumeist nur die ökonomisch werthaltigen Materialien eines kristallinen Siliziumsolarmoduls Diskussionsgegenstand der Literatur sind – wiederum mit dem Ziel der Einsparung von Produktionskosten. Dieses Kapitel soll indessen nicht nur diese kostengetriebenen Ansätze hinsichtlich der Auswirkungen auf eine Recyclingaktivität untersuchen, es sollen vielmehr das Gros der Maßnahmen diskutiert werden, denen tatsächlich ein Verwendungspotenzial in zukünftigen kristallinen Siliziumsolarmodulen zuzuschreiben ist. Zu diesem Zweck werden betreffende Komponenten bestimmter Funktionsbereiche in den subsekutiven Unterkapiteln gebündelt untersucht.

5.5.2.1 Zellen und Verbinder

Ein Hauptgegenstand vergangener sowie gegenwärtiger Untersuchungen auf Ebene der Zellen und der Zellenverbinder ist die Substitution oder Reduktion von Silber und Blei bei der Produktion eines $gSSM_{sc/mc}$. Im Falle von Silber ist dies in besonderem Maße auf die potenzielle Senkung der Produktionskosten zurückzuführen, wenngleich in diesem Zusammenhang ökologische Effekte nicht zu vernachlässigen sind. So ist laut [Behrendt *et al.* 2010, S. 79] der Primärgewinnung von Silber ein enormes Humantoxizitätspotenzial zuzuschreiben. Silber findet nach Anhang 4-9 einzig mittels der verwendeten Druckpasten für den Siebdruck der Frontkontakte und der Lötkontaktflächen auf der Zellenrückseite Einzug in die Produktionsbilanz eines $gSSM_{sc/mc}$. Dementsprechend stehen vor allem die Druckpasten im Fokus etwaiger Untersuchungen, wobei kurzfristig gezielt deren Reduktionspotenzial gesamt (Verringerung der Fingerbreite) sowie die

Reduktion des Silberanteils in der Paste und langfristig die Entwicklung silberfreier Druckpasten als adäquate Substitute Forschungsgegenstand sind. Neben der Minimierung des Silbereinsatzes ist der prominenteste Ansatz die Substitution durch kupferhaltige Druckpasten. [Cellere *et al.* 2016, S. 11] geht bis 2026 von einer Reduzierung des Silbergehaltes je Zelle um 50 % aus. Gleichwohl wird dem Einsatz silberfreier (kupferhaltiger) Kontaktierungen im Jahr 2026 ein Marktanteil von 25 % zugeschrieben. [Behrendt *et al.* 2010, S. 80] attestiert diesem Ansatz ebenfalls eine sehr hohe Bedeutung. Obschon die Reduktion des Silberanteils oder dessen Substitution durch Kupfer die Fertigungskosten eines $gSSM_{sc/mc}$ ob geringerer Materialkosten zu senken vermag, geht dies mit einer Verringerung des Zellenwirkungsgrades einher. Zudem gilt es die Oxidation des Kupfers über den Produktlebenszyklus zu minimieren. Aus Sicht des Recyclings von $gSSM_{alt}$ würde ein reduzierter Silberanteil oder gar dessen Substitution entsprechende Einbußen bei den potenziellen Absatzerlösen dieser spezifischen Outputfraktion zeitigen und sich sonach negativ auf den Nettogegenwartswert einer etwaigen Recyclingaktivität auswirken. Eine totale Substitution des Silbers zieht bei einem Recycling zur Verwertung eine Reduzierung der potenziellen Einzelerlöse um circa 17,5 % nach sich – ein vergleichsweise hohes Risiko für Recycler, welches es ob der zumeist produktionsgetriebenen Evolution als wahrscheinliches Szenario nicht zu unterschätzen gilt. Erste Ansätze für silberfreie Kontaktierungen finden derweilen bereits Einzug in die Produktionstechnologien. So zeigen beispielshalber Untersuchungen des Industrial Technology Research Institute (ITRI – taiwanesische Non-Profit Forschungseinrichtung) bereits sehr gute Ergebnisse. Auch [Natcore Technology Inc. 2015] berichtet von sehr guten Ergebnissen – allerdings mittels der Substitution durch Aluminium. Diese firmeneigenen Angaben wurden jedoch bisher nicht unabhängig bestätigt.

Bei der angestrebten Reduktion beziehungsweise Substitution von Blei ist indessen vornehmlich die Ökologie das treibende Movens. Blei findet über die Verwendung von bleihaltigen Lötlegierungen zur Verbindung einzelner Zellen zu einem String und analog des Silbers über die Druckpasten für die Frontkontakte und die Lötkontaktflächen der einzelnen Zellen Einzug in die Produktion von $gSSM_{sc/mc}$. Wie bereits im Kapitel 4.6.1 erwähnt, unterliegt die Verwendung bleihaltiger Lötlegierungen hinsichtlich der Photovoltaiktechnologie durch die Präklusion von Photovoltaikmodulen nach Artikel 2, Abs. 4, Buchstabe i der EU Richtlinie 2011/65/EU, beziehungsweise Artikel 1, Abs. 2, Nummer 9 der ElektroStoffV keiner Verwendungseinschränkung. Eine Substitution wäre

folglich eine freiwillige Verbesserung der Ökobilanz. Dieser Aspekt stellt jedoch einen möglichen Anreiz für verschiedene Produzenten dar, da eine Herstellung von „bleifreien" kristallinen Siliziumsolarmodulen trotz daraus resultierenden Nachteilen in der Moduleffizienz, der Langzeitstabilität der Lötstellen und meist höheren Produktionskosten ob teureren Substituten und höher benötigten Prozesstemperaturen einen positiven Effekt auf das Firmenimage zeitigen kann – im Bereich grüner Technologien ein nicht zu unterschätzender Faktor. Auch im Sinne des Recyclings wäre eine gänzliche Substitution von Blei natürlich zu begrüßen, nicht zuletzt ob der Pyrolyse bei einem $Recycling_{VN}$. Zudem kann ein etabliertes, vernünftig ausgelegtes und umfassendes Recyclingkonzept entscheidend dabei helfen, einen Eintrag von Blei in die Umwelt zu verhindern. Die Bleianteile in einem $gSSM_{sc/mc}$ werden bei einem Recycling unter kontrollierten Bedingungen in einem geschlossenen System durch Sekundärmaßnahmen abgefangen. Werden die Altmodule indessen nicht fachgerecht einem adäquaten Recyclingprozess zugeführt, können Teile des Bleis über Diffusion oder Auswaschprozesse in die Umwelt gelangen. Neben der Substitution von Blei durch beispielshalber Silber, wie in der Elektronikbranche üblich, können bleifreie kristalline Siliziumsolarmodule auch über die Anpassung des Moduldesigns generiert werden. Eine Möglichkeit ist die lötfreie Kontaktierung mittels des bereits im Kapitel 5.5.1.3 diskutierten Ansatzes der kunststofffreien Verkapselung. Infolge des Unterdrucks zwischen den beiden Glasscheiben werden die kupferhaltigen Zellenverbinder auf die Kontakte der einzelnen Solarzellen gedrückt. Nach [Lüdemann *et al.* 2005] werden dafür die Zellenverbinder in der üblichen Form zwischen benachbarten Zellen eines Strings platziert, jedoch in federnder Ausführung. So positiv dieser Ansatz zur Modifikation des Moduldesigns sich in Summe darstellt (recyclinggerechte Konzeption, Minimierung des Bleigehaltes ob lötfreier Kontaktierung und ein nahezu rein stoffliches Verwertungspotenzial), so schwer wiegen die Probleme infolge der Konstruktionsspezifik. Dies zeigt sich in besonderer Weise hinsichtlich der lötfreien Kontaktierung. Zum einen darf der Druck, der auf den Zellen zur Fixierung lastet, nicht zu groß sein, da die Zellen ob deren geringen Schichtdicke enorm bruchanfällig sind. Zum anderen sinkt mit geringerem Pressdruck die fixierende Wirkung, da eine feste Vernetzung mit dem Verkapselungsmaterial per se nicht möglich ist. Mit Fokus auf die Kontaktierung liegt die Problematik sonach vor allem darin, dass die Zellen oder die Verbinder bei Rüttel- oder Stoßbewegungen des Moduls schlicht verrutschen können. Dabei kann schon eine geringfügige Lageveränderung einer der beiden Komponenten zum totalen Kontaktverlust führen, mit all seinen negativen

Auswirkungen auf die Leistung des Moduls. Dies hängt auch mit der kostengetriebenen Reduzierung der Kontaktflächen ob des Einsparpotenzials von Silber in der Produktion zusammen. Denn je dünner die Kontaktflächen ausgeführt werden, desto geringer sind die Toleranzen bis zum Kontaktverlust. Ein anderer Ansatz ist die Verklebung von Rückkontaktsolarzellen mittels eines elektrisch leitenden Klebstoffes in einer substrate-Konfiguration. Allerdings wurden die Auswirkungen dieser verklebten Solarmodule auf das Recycling bis jetzt nicht untersucht. Es können sonach keine Aussagen getroffen werden, welche zusätzlichen Anforderungen der Kleber sowohl stofflich als auch verfahrenstechnisch an einen Recyclingprozess stellt. In toto geht [Cellere *et al.* 2016, S. 16] davon aus, dass bereits im Jahr 2023 die Hälfte aller kristallinen Siliziumsolarmodule bleifrei kontaktiert werden. Neben den ökologischen Vorteilen ergeben sich indessen nur geringe ökonomische Einsparpotenziale für das Recycling. Dies geht vor allem auf einen vermeintlich geringeren Aufwand für Sekundärmaßnahmen zurück. Gleichwohl ist bisher nicht klar, welche Konsequenzen aus dem Einsatz alternativer Zellenkonzepte und Verbinder tatsächlich für potenzielle Recyclingaktivitäten resultieren.

Wesentlich stärker dürfte sich die weitere Reduzierung der Schichtdicken kristalliner Siliziumsolarzellen auf die Recycler auswirken. Dies geht nicht nur auf den geringeren Siliziumgehalt je Modul zurück, sondern speziell im Falle eines Recycling$_{VN}$ auf steigende Bruchraten. Analog des Recyclings zur Verwendung muss auch die Verfahrenstechnik der Produktion an die Bedingungen, die mit immer dünneren Wafern / Zellen einhergehen, angepasst werden, wenngleich die Reduktion der Schichtdicken aus einem rein kostengetriebenen Stimulus zur Senkung der Materialkosten in der Produktion kristalliner Siliziumsolarmodule resultiert. Wie bereits im Kapitel 4.5.3 dargelegt, beträgt die durchschnittliche Schichtdicke von Standardsiliziumsolarzellen in der industriellen Massenfertigung rund 180 µm. Laut [Cellere *et al.* 2016, S. 10] kann innerhalb der nächsten 10 Jahre mit einer Reduktion der Schichtdicke um über 20 % gerechnet werden, wobei 100 µm zum jetzigen Stand der Technik noch als minimale Schichtdicke gelten. Hauptproblem für die Produktion und das Recycling$_{VN}$ ist der damit zusammenhängende Anstieg des Bruchausschusses, sofern die Verfahrenstechnik nicht entsprechen angepasst wird. Die Anpassung der Verfahrenstechnik diesbezüglich begreift hauptsächlich zwei Teilaspekte der gesamten Produktions- und Recyclingsequenzen ein: das Handling der Wafer / Zellen während der einzelnen Prozesse und der Transfer zwischen den jeweiligen

Prozessschritten. Laut [Giesen *et al.* 2014] geht mit der Reduzierung der Schichtdicken eine Verringerung der mechanischen Belastbarkeit der Substrate einher. Neben der Schichtdicke spielt jedoch auch das Verhältnis der Kantenabmessungen eine entscheidende Rolle. So können erhöhte Bruchraten auch bereits aus der geplanten Anpassung der Längen- und Breitenmaße der Wafer auf 210 x 210 mm resultieren. Zu den steigenden Anforderungen des Handlings immer dünnerer Wafer / Zellen oder von Substraten mit einem entsprechend schlechteren Verhältnis der Kantenabmessungen ergibt sich noch ein weiteres Spannungsfeld: die Forderung nach einem hohen Durchsatz. Teilaspekt dabei ist auch das aerodynamische Verhalten der Wafer und Zellen beim Prozesstransfer. Hier scheinen jedoch laut [Giesen *et al.* 2014] bereits einfache technische Maßnahmen wie ein Windschutz stückweit Abhilfe zu leisten. Wenngleich die Problematik produktionskostengetrieben ist und sonach eine hohe Realisationswahrscheinlichkeit besitzt, kann die Verfahrenstechnik eines Recyclingansatzes zur Verwendung Maßnahmen aus der Produktion übernehmen. Denn ohne Anpassung der Produktionstechnologien lassen sich auch keine Wafer weiter sinkender Schichtdicken mit dem Standardansatz der Vereinzelung aus dem Drahtsägeprozess ohne enorm ansteigende Bruchraten ökonomisch tragend produzieren. Es müssen folglich erst andere Produktionstechnologien und prozessinterne Transportmöglichkeiten etabliert werden. Eine Einführung diesbezüglich bietet [Brendel *et al.* 2013], worin sich ein Überblick potenzieller verlustfreier Vereinzelungsverfahren aus verschiedenen Medien (fest, flüssig, gasförmig) findet. Wenngleich mit Blick auf das Recycling erhöhte Bruchraten aus der Reduktion der Schichtdicke einzig für das Recycling$_{VN}$ negative Effekte zeitigen würden, beeinflusst der sinkende Materialgehalt, der letztlich den ursprünglichen Beweggrund zur Reduktion der Schichtdicken darstellt, die erzielbaren Einzelerlöse beider Recyclingformen (Verwendung und Verwertung) negativ. Die Risiken, die sich aus diesem Trend für einen potenziellen Recycler ergeben, liegen jedoch nicht alleinig in reduzierten Einzelerlösen ob geringwertigerer Outputfraktionen oder der sinkenden Quantität einer werthaltigen Ingredienz. Mit Blick auf ein Recycling$_{VN}$ ist zurzeit nicht abzusehen, welche Auswirkungen dies sowohl auf die Verfahrenskosten als auch auf die Sammel- und Transportkosten hat. Laut [Mertens 2011, S. 140] führen bereits die heute üblichen Schichtdicken von 180 µm zu erhöhten Bruchraten während potenzieller Recyclingprozesse zur Verwendung, was letztlich deren ökonomische Attraktivität sinken lässt.

Potenzielle Recycler sind noch einem weiteren unkalkulierbaren Risiko ausgeliefert: der steten Fortentwicklung der kristallinen Siliziumsolarzellentechnologie. Dabei unterscheiden sich neuere Solarzellenkonzepte von älteren Standardzellen nicht nur hinsichtlich der verwendeten Materialien, sondern vor allem durch die Art deren Verwendung. Mittlerweile erhalten Hocheffizienzzellen wie die Rückkontaktzellen, Zellen mir „vergrabenen" Frontkontakten oder MWT-Zellenkonzepte Zugang zum Massenmarkt. Wie bereits im Kapitel 3 dargestellt und ausführlich diskutiert, resultieren aus den abweichenden Ansätzen vollkommen heterogene Zellenkonzepte mit einem völlig unterschiedlichen Zellenaufbau. Zusammen mit den Erkenntnissen aus Kapitel 5.3 bezüglich der Reihenfolge der verschiedenen Ätzbäder beim Recycling und der desideraten Forderung, dass die einzelnen Ätzschritte jeweils vollkommen abgeschlossen sein müssen, lässt sich die Schwierigkeit für Recycler mit dem Umgang nicht uniformer Zellenkonzepte erahnen. Die unterschiedlichen Zellenkonzepte stellen gleichwohl auch abweichende Anforderungen an das zugehörige Moduldesign. Rückkontaktsolarzellen werden anders elektrisch verbunden, wie beispielhalber Zellen mit vergrabenen Frontkontakten. Hinzu kommen Solarzellen, die einen bifacialen Modulaufbau benötigen. Sowohl die Pyrolyseöfen samt Temperaturprofil als auch die Gesamtheit der Chemikalienbäder mit deren Reihenfolge und Prozessdauer müssten sonach jeweils penibel an die unterschiedlichen Anforderungen angepasst werden, was die Verfahrenskosten erhöht. Andernfalls resultieren qualitativ geringwertige Outputfraktionen, die einen Einbruch der potenziellen Erlöse aus dem Recycling zeitigen. Der ökonomische Gesamteffekt auf das Recycling zur Verwendung wie zur Verwertung ist folglich negativ einzustufen. Laut [Cellere *et al.* 2016, S. 29ff] steigt jedoch nicht nur die Anzahl potenzieller Variationen, auch ihr Marktanteil nimmt stetig zu. Dabei beginnt der Trend zur Nutzung alternativer Zellenkonzepte schon bei der Wahl der Dotierung der Waferbasis. Wenngleich eine p-dotierte Basis bislang den industriellen Standard darstellt, sollen laut [Cellere *et al.* 2016, S. 29] Wafer mit einer n-dotierten Basis im Jahr 2020 einen Marktanteil von mehr als 20 % erreichen; 2026 bereits mehr als 30 %. Diese Entwicklung lässt sich auch über Gespräche mit Experten bestätigen. Wie bereits angedeutet, kommen da noch die verschiedenen Zellenkonzepte hinzu. In den kommenden 10 Jahren wird kein Ansatz innerhalb der kristallinen Siliziumsolarzellentechnologie einen Marktanteil von 50 % besitzen, jedoch mit einem klaren Trend zu Rückkontaktzellen [Cellere *et al.* 2016, S. 32]. Ein noch gewichtigerer Einfluss auf die Gewinnschwelle eines Recyclingansatzes zeitigt ein Anstieg der Marktanteile von bifacialen Modulen, wobei sich hier auch ein

positiver Effekt aus der damit einhergehenden Erhöhung der Glasfracht je recyceltem Altmodul ergeben kann. Allerdings ist bei einer beidseitigen Verglasung der Module auch von einer Senkung der einzelnen Schichtdicken beider Glasscheiben auszugehen, da die mechanische Stabilität des Gesamtmoduls eine Funktion der Summe beider Glasschichten darstellt.

Die in diesem Unterkapitel diskutierten Variationen, denen mitunter ein hohes Potenzial zur Generierung zukünftiger Marktanteile zukommt, haben jeweils Auswirkungen auf die Form der Produktionsausschüsse (kurzfristig) als auch auf zukünftige Altmodulströme aus dem Erreichen des Lebenszyklusendes (langfristig). In toto ergibt sich folglich ein nicht kalkulierbares Risiko, dem ein potenzieller Recyclingansatz allein aufgrund anstehender Anpassungen auf Ebene der Solarzellen und Zellenverbinder unterworfen ist – im Gros mit negativen Auswirkungen auf die Gewinnschwelle und damit die benötigte Investitionsentscheidung.

5.5.2.2 Verkapselungsmaterial

Neben den bereits im Kapitel 5.5.1.3 diskutierten Möglichkeiten zur Substitution des Verkapselungsmaterials bezüglich eines recyclingorientiertes Moduldesigns existieren zwar noch weitere Ansätze, diese konzentrieren sich zumeist jedoch auf den Einsatz thermoplastischer Elastomere wie benanntes TPO. Die Verwendung thermoplastischer Elastomere bringt nicht nur für das Recycling Vorteile mit sich, wie beispielshalber eine wärmegesteuerte Verformbarkeit ob der vorrangigen physikalischen Vernetzung der Schichten, sie bieten auch in der Produktion kristalliner Siliziumsolarmodule einige Vorzüge. So sollen laut [Wallner 2013] kürzere Laminierungszyklen, eine kontinuierliche Produktion sowie eine verbesserte Performance möglich sein. Weitere physikalisch vernetzende Alternativen sind Ionomere und thermoplastische Stärke (TPS). Auf Seiten der chemisch vernetzenden Laminate bildet Polyvinylbutyral (PVB) eine Alternative zu EVA. [Cellere *et al.* 2016, S. 16] spricht allerdings einzig den thermoplastischen Elastomeren auf Olefinbasis das Potenzial einer Etablierung in der Produktion zu. Sonach sollen bereits im Jahr 2023 circa 25 % der kristallinen Siliziumsolarmodule mittels TPO verkapselt werden. Durch die Etablierung anderer Verkapselungsmaterialien in der Produktion von kristallinen Siliziumsolarmodulen ergeben sich für das Recycling von Altmodulen unterschiedliche Potenziale. Werden physikalisch vernetzende Laminierungsfolien eingesetzt, kann eine mechanische Öffnung des Materialverbundes durch eine

gezielte Wärmezufuhr erfolgen. Zum anderen geht mit dem Einsatz zu EVA alternativen Verkapselungsfolien auch die Möglichkeit einher, die Rückseitenfolie zu variieren. Dies stellt den eigentlichen Vorteil für ein potenzielles Recycling dar, da auf die fluorhaltige Tedlarfolie verzichtet und diese womöglich durch eine Variante ersetzt werden kann, die kein Fluor enthält. Es ergibt sich aus der Substitution des Verkapselungsmaterials folglich das Potenzial sowohl die Verfahrenskosten einer Recyclingaktivität zu senken, als auch die erzielbaren Erlöse ob einer eventuellen stofflichen Rückführung, wenngleich auch nur marginal, zu erhöhen.

5.5.2.3 Glas

Das in dieser Arbeit definierte $gSSM_{sc/mc}$ besitzt auf der lichtzugewandten Modulseite ein 3,5 mm starkes und thermisch vorgespanntes Kalknatroneinscheibensicherheitsweißglas mit geringem Eisengehalt. Wie bereits im Kapitel 5.4.2.2 diskutiert, ist eine direkte Wiederverwendung mit einigen Hindernissen verbunden. So können Kratzer oder Beschädigungen, die während der Nutzungsphase durch beispielshalber Umwelteinflüsse, der Sammlung und dem Transport zum Recycling oder den Recyclingprozessen selbst auftreten, nicht mittels der Recyclingtechnologien behoben werden. Im Falle eines $Recycling_{VN}$ kann sonach ein „Umweg“ über einen Glasveredler notwendig werden. Dies reduziert unter Umständen jedoch die potenziellen Erlöse dieser Outputfraktion erheblich. Zudem können Verunreinigungen auf atomarer Ebene durch Diffusion von Aluminiumatomen aus der Modulrahmung in das Glas während des gesamten Lebenszykluses die optischen Eigenschaften verschlechtern, was eine brancheninterne Wiederverwendung ausschließt; allerdings können sich daraus auch Potenziale einer branchenexternen Weiterverwendung ergeben. Es zeigt sich demnach eine Fülle an Möglichkeiten, die einen Einfluss auf die Qualität dieser Outputfraktion aus einem $Recycling_{VN}$ ausüben. Hinzu kommen wiederum produktionsgetriebene Veränderungen zur Senkung der Modulherstellungskosten, wobei das Hauptaugenmerk auf der Substitution des Floatglases durch ein Walzglas liegt. Nach [Behrendt *et al.* 2010, S. 75] bringt der Einsatz von Walzglas folgende Vorteile mit sich. Zum einen erfolgt der Herstellungsprozess bei niedrigeren Temperaturen, was entsprechend den Energiebedarf (um 45 %) und damit die Produktionskosten senkt. Zum anderen kann schon während des Walzprozesses der Glasscheibe eine Texturierung zur Senkung der Reflexionsraten auf die Oberfläche aufgebracht werden. Die Verwendung von thermisch gehärtetem Walz-

glas ermöglicht zudem eine Reduzierung der Glasstärke von 3,5 mm auf 2 mm bei gleicher Zugfestigkeit und Steifigkeit. Es ergeben sich sonach zusätzliche Kosteneinsparpotenziale in der Produktion. Der Nachteil von Walzglas liegt darin, dass die Oberfläche ungleichmäßiger als bei Floatglas ausfällt, jedoch für die Belange der Photovoltaikindustrie noch im Rahmen der Anforderungen. [Behrendt *et al*. 2010, S. 78] Daneben existieren aber auch weitere Ansätze, wie beispielshalber der Einsatz von Glasscheiben, die das auftreffende Strahlungsspektrum anpassen. Hierzu wird auf das Glas eine ultradünne fluoreszierende Schicht aufgebracht, die die hochenergetischen blauen und ultravioletten Anteile des Lichtes in für kristalline Siliziumsolarzellen gut absorbierbare Wellenlängen des roten und grünen Spektralbereiches umwandelt. [PES 2014]

Für potenzielle Recyclingaktivitäten zur Verwendung sind in diesem Zusammenhang jedoch speziell die Dimensionen der Glasscheiben entscheidend. Dies umfasst alle Kantenabmessungen, also Länge, Breite und Höhe. Mit dem Einsatz dünnerer Glasscheiben in der Produktion neuer Solarmodule bricht ein Absatzmarkt für Recycler weg, die sich speziell auf eine brancheninterne Wiederverwendung ausrichten. Gleiches gilt für Veränderungen in Breite und Länge der kristallinen Siliziumsolarmodule durch beispielshalber den Einsatz halber Zellen, der Veränderung der Zellengrößen auf 210 mm² oder der Erhöhung der Zellenanzahl je Modul auf 72 Stück. Alle aufgezählten Variationen gelten als hochwahrscheinliche Anpassungen zukünftiger Modullayouts, die immer eine Veränderung der Modulgröße zum Resultat haben. Selbst bei einem Recycling zur branchenexternen Weiterverwendung stellen die Modifikationen der Dimensionen der Glasscheiben ein Problem dar, da dies ebenfalls dazu führen kann, dass der Prozessoutput nicht mehr die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Absatzmärkte bedienen kann. Im Gegensatz dazu wird ein $\text{Recycling}_{\text{VR}}$ bei weitem nicht so stark beeinflusst. Vor allem jedoch die Reduzierung der Schichtdicke führt zu einem geringeren Anteil der spezifischen Outputfraktion am Gesamtoutput, was wiederum mit reduzierten Einzelerlösen verbunden ist. Allerdings profitiert ein $\text{Recycling}_{\text{VR}}$ von der Tendenz zu bifacialen Modulen, da sich dadurch entsprechend der Glasanteil nahezu verdoppelt und sonach die potenziellen Erlöse aus der Veräußerung der Outputfraktionen ansteigen (im Unterschied zu Rückständen aus der Pyrolyse der Rückseitenfolie).

In toto zeigt sich, dass aus der Veränderung der Moduldimensionen ebenfalls ein hohes Risiko für potenzielle Recyclingaktivitäten resultiert. Für langfristige Investitionsplanungen wäre sonach eine Standardisierung der Technologie wünschenswert.

5.5.3 Produkttypung

Wie die vorangegangenen Betrachtungen aufgezeigt haben, unterliegen potenzielle Recyclingaktivitäten unkalkulierbaren Risiken. Dies bezieht sich nicht nur auf die imponderable zukünftige Entwicklung und den Einfluss etwaiger Technologietrends, sondern auch auf die bereits vorherrschende Produktvielfallt innerhalb der kristallinen Siliziumsolartechnologie. Es zeigte sich zudem, dass zwar unter idealen Voraussetzungen ein $Recycling_{VN}$ ein $Recycling_{VR}$ sowohl ökologisch als auch ökonomisch zu dominieren scheint, realiter ein $Recycling_{VN}$ aber einer zusätzlichen Anzahl an Risiken unterliegt, die per Definition für einen Verwertungsansatz entfallen. Diese zumeist negativen Einflüsse auf die erzielbaren Einzelerlöse und die Verfahrenskosten äußern sich entsprechend in einer Verschlechterung der Break-evens der Nettogegenwartswerte. Obzwar den Effekten aus den spezifischen Risiken kein absoluter Betrag der Beeinflussung zugewiesen werden konnte, zeigten sich zumindest die Potenziale und die Eintrittswahrscheinlichkeiten prädiktabel. Gleichwohl konnte so in Summe ein weiterer Hemmnisfaktor identifiziert werden, da die Gesamtheit der Risiken eine langfristige und gesicherte Investitionsplanung mindestens erschweren.

Eine Möglichkeit diese Risiken zu reduzieren, findet sich in der Standardisierung der Produkte; genauer der Produkttypung[170]. Wenngleich sich dies gesamttechnologisch aufgrund der Vielzahl der mit den verschiedenen Halbleitern einhergehenden Anforderung an den generellen Modulaufbau und die Produktionsprozesse seinerseits stark negativ auswirken würde, so kann zumindest innerhalb der Gruppe der kristallinen Siliziumsolartechnologie eine Festlegung spezifischer Erzeugnismerkmale, wie beispielshalber Form oder Kantenmaße, einen systemischen Vorteil zeitigen. Obschon auch die kristalline Siliziumsolartechnologie sich stetig weiterentwickelt, da das Wirkungsgradoptimum noch nicht erreicht ist, handelt es sich bei dem Gros der Anpassungen um produktionskostengetriebene Stimuli. Zudem fehlt es an einer übergreifenden Betrachtung der Produktion, die auch die Potenziale aus einem Recycling impliziert. Sonach könnten Materialnormungen[171] einen Recyclingprozess begünstigen, woraus letztlich auch Kostenvorteile für die Produktion neuer kristalliner Siliziumsolarmodule resultieren.

---

[170] Produkttypung zielt auf die Vereinheitlichung von Erzeugnissen ab, wobei gezielt Erzeugnismerkmale festgelegt werden. Bezogen auf die Produktion wird der Prozessoutput beeinflusst.

[171] Materialnormung reduziert hingegen die Teilevielfalt, indem eine Vereinheitlichung von Materialien und Einsatzteilen angestrebt wird und zielt damit in der Produktion auf den Input ab. Damit stellt die Materialnormung einen notwenigen Teilaspekt der Produkttypung dar.

Dies würde einer Standardisierung einen starken Anreiz verleihen weil getrieben vom Reduktionspotenzial der Produktionskosten. Ein negativer Effekt einer Produkttypung ist allerdings die Uniformierung der Produkte verschiedener Hersteller. Indessen müssen mit Blick auf ein ökonomisch tragfähiges und ökologisch sinnvolles Recycling letztlich jedoch nicht alle Merkmale eines kristallinen Siliziumsolarmoduls in einer Produkttypung einbegriffen werden. Sinnvolle Attribute wären beispielhalber die Dimension der integrierten Wafer, die Ausmaße der Frontscheibe sowie die geometrische Form und die Kantenlängen eines Moduls. Dies würde die Risiken zur direkten brancheninternen Wiederverwendung der Glasscheibe, der Solarzellen und der Modulrahmung auf qualitative Anforderungen reduzieren; sich folglich positiv auf die langfristige Planung der erzielbaren Erlöse aus dem Recycling auswirken und strategische Ausrichtungen auf spezielle Absatzmärkte ermöglichen. Gleichwohl würden sich aus der Standardisierung der genannten Produktattribute auch Potenziale zur Senkung der Verfahrenskosten einer Recyclingaktivität ergeben. Eine standardisierte geometrische Produktform, die alle Kantenabmessungen einbegreift, hätte enormen Einfluss auf die Auslegung der Verfahrenstechnik und die Prozessoptimierung. Es ist klar nachvollziehbar, dass die Kosten für Ätzbäder, wie sie beim Recycling nach Kapitel 5.3 genutzt werden, aufgrund einer genauen Auslegung und Anpassung an eine festgelegte geometrische Ausprägung des Inputs im Vergleich zu einer Diversität der Module geringer ausfallen. Gleiches gilt auch hinsichtlich der Auslegung und der Betriebsweise von beispielshalber Pyrolyseöfen. Hinzu kommen die Anpassungen von Temperaturprofilen, Ätzdauern et cetera an unterschiedliche Dimensionen des Prozessinputs; im Gegensatz zu einem uniformen Moduldesign. Dies gilt analog für die Abmessungen inklusive der Dicke der integrierten Solarzellen.

Ein weiterer Kritikpunkt einer etwaigen Produkttypung kristalliner Siliziumsolarmodule ist eine damit einhergehende Verhinderung oder Abschwächung des Entwicklungspotenzials der Technologie. Dies ist auch insofern richtig, als dass eine Etablierung möglicher neuer Modulkonzepte am Markt, vielleicht sogar mit einem recyclingorientierten Moduldesgin, so obstruiert werden könnte. Es kann sich folglich in der Konsequenz auch ein Nachteil für eine potenzielle Recyclingaktivität ergeben, der ohne eine Produkttypung nicht Existent wäre.

5.6 Optimierungsansätze der Beschaffungslogistik

Dieses Kapitel soll ergänzend zu den bisherigen Erläuterungen weiterführende Ansätze zur Optimierung bei abweichenden Rahmenbedingungen besonders hinsichtlich der potenziellen Reduktion der Sammel- und Transportkosten diskutieren. Etwaige Optimierungsprobleme werden dabei jedoch lediglich benannt und die zugehörige Lösungsstrategie dargestellt; eine ausführliche Kalkulation anhand gewählter Beispiele ist nicht zielführend, da der Fokus mehr auf der Generierung eines problemspezifischen Maßnahmenkataloges als auf Bildung neuer Szenarien liegt.

5.6.1 Kurz- und mittelfristige Planungsphase

In der kurzfristigen Planungsphase sollte nach Tabelle 5-22, Kapitel 5.4.4.3, Seite 563 die Analagenkapazität einer etwaigen Recyclingaktivität bei gewünschter Vollauslastung in der Region des ostdeutschen PV-Produktionsclusters maximal 1.450 Tonnen je Jahr betragen. Eine Erhöhung dieser Grenzkapazität erscheint lediglich mit Eintreten der Massenströme (offener Geltungsbereich) oder mit einer Ausweitung des Einzugsgebietes sinnvoll. So kann der vorbenannten Tabelle entsprechend bereits eine Ausweitung der betrachtungsrelevanten Region auf Sachsen samt der deutschseitigen Anrainer inklusive Berlin dazu führen, dass entweder die anlagenspezifische Kapazitätsgrenze auf 2.850 t/a angehoben oder eine zweite Anlage mit gleicher Kapazität[172] installiert werden könnte. Mit steigender potenzieller Anlagenkapazität steigen gleichwohl gesamtsystemisch die Sammel- und Transportkosten zur Beschaffung des Prozessinputs, unabhängig der Anzahl betriebener Recyclingaktivitäten[173]. Wenngleich sich die Gesamtkosten dieser Rubrik ebenfalls wie im Kapitel 5.4.3.2 infolge einer Standortoptimierung positiv beeinflussen lassen, existieren selbst bei einer für spezifische Rahmenbedingungen optimalen Standortwahl weitere Einsparpotenziale dieser Kostenrubrik ob einer Vielzahl sonstiger Einflussfaktoren. Ein prominenter Vertreter ist die Bündelung von Einzelfahrten zur Reduktion von Leerfahrten infolge einer Tourenplanung. Dabei lässt sich das Optimierungsproblem in seinen Grundzügen als eine knotenorientierte Rundreise

[172] Es können auch, je nach Wirtschaftlichkeit der Gesamtprozesse, Anlagen verschiedenster Kapazitäten errichtet werden, sofern die Summe 2.850 t/a nicht überschreitet.

[173] Ausgenommen von Spezialfällen, bei denen sich die Standorte der Recyclinganlagen mit allen möglichen Übergabestellen und Produktionsstätten örtlich überschneiden.

interpretieren. Allerdings ist ob der Kapazitäts- und Zeitrestriktionen der Transportfahrzeuge für die zugrunde liegenden Dimensionen kein Hamiltonscher Zyklus möglich, weshalb Lösungsansätze für TSP-Strukturen (TSP ist das Akronym für: Traveling Salesman Problem; deutsch: Problem des Handlungsreisenden) nicht applikabel sind. Dies schließt heuristische Verfahren wie beispielhalber die Konstruktionsverfahren „Nearest neighbor“, den Algorithmus von Christofides, den Greedy-Algorithmus oder Einfüge-Heuristiken (Zick-Zack-Linien-Verfahren, dynamisches Zuordnungsverfahren oder Zwiebelschalenheuristik) aus. Gleiches trifft auf heuristische Verbesserungsverfahren wie das Austauschverfahren „r-opt“ oder exakte Lösungsstrategien wie den Branch & Bound Algorithmus zu. Da die Tourenplanproblematik in der Regel NP-schwer ist, erfolgt üblicherweise eine Zweiteilung der Problemstellung. Basis bildet ein Tour-Konstruktionsverfahren, was einzelne Knoten einer Tour zuordnet. Darauf aufbauend kommt ein Tour-Verbesserungsverfahren zur Anwendung, was letztlich die zuvor gewonnenen Teillösungen optimiert. In der Konsequenz ergibt sich aus der Differenzierung in Teilprobleme für jede Tour wiederum ein Problem des Handlungsrundreisenden. Typische Konstruktionsverfahren sind zuvörderst der Sweep-Algorithmus, das Savings-Verfahren und die sequenzielle Zirkelmethode. Basis aller drei Konstruktionsverfahren bildet neben einer Entfernungsmatrix eine geographische Lokalisierung der Knoten und deren Projektion in ein zweidimensionales kartesisches Koordinatensystem. Zudem müssen die knotenspezifischen Beiträge bekannt sein, welche im vorliegenden Fall deren Altmodulaufkommen gleichkommt.

Die Beschreibung der Tourenkonstruktionsverfahren orientiert sich an [Bierwirth 2008]. Für zusätzliche Informationen zu den beschriebenen Verfahren und Algorithmen, der Tourenplanung allgemein, weiteren Modellen und Ansätzen, vertiefenden Fragestellungen sowie der Diskussion anhand von Beispielen wird der interessierte Leser an dieser Stelle auf [Vahrenkamp 2003] und [Domschke und Scholl 2010] verwiesen.

5.6.1.1 Sweep-Algorithmus

Beim Sweep-Algorithmus (deutsch: Besenalgorithmus) ist das kartesische Koordinatensystem so auszurichten, dass sich das Depot oder die Zielanlage im Koordinatenursprung befindet. Allen anderen Knoten sind Koordinaten der Form (x_i,y_i) zuzuordnen. Grundlegend werden zuvörderst einzelne Knoten zu einer Tour zusammengefasst, woraufhin diese Teiltouren dann eigenständig wie ein TSP optimiert werden. Die Zuteilung von

Knoten zu den Einzeltouren erfolgt über aufsteigende Polarwinkel. Dabei werden solange Knoten der jeweiligen Einzeltour zugefügt, bis als Abbruchkriterium die Kapazitäten der Transportmittel erschöpft sind oder die maximale Fahrzeit erreicht ist. In diesem Fall wird die Teiltour mit den entsprechend zugeordneten Knoten geschlossen und eine neue Teiltour mit dem nächsten Knoten eröffnet (entspricht dem Knoten, der im Koordinatensystem durch den weiter aufsteigenden Polarwinkel zuerst tangierter wird). Durch Verschiebung des Koordinatenursprungs lässt sich jedoch eine Vielzahl alternativer Tourenpläne generieren, wobei die Anzahl an Varianten der Anzahl an Knoten gleicht. Es können sonach n Teillösungen erzeugt werden, wobei infolge der internen TSP-Struktur und -Optimierung nicht jede Lösung das Gesamtoptimum anzeigt. Ein Spezialfall des Sweep-Algorithmus ist das Verfahren der Giant-Route. Hier wird zunächst ohne kapazitive Restriktionen eine Megatour (umfasst alle relevanten Knoten) ermittelt und über einen TSP-Ansatz optimiert. Im Anschluss erfolgt eine Aufteilung zu den kapazitätsbedingten Teilrouten analog des Sweep-Algorithmus.

5.6.1.2 Savings-Verfahren

Hierbei handelt es sich um einen Ansatz, der parallel zueinander mehrere Touren bildet und verändert. Zu Beginn wird zwischen jedem Knoten und dem Depot beziehungsweise der Zielanlage eine Pendeltour gebildet – analog der im Kapitel 5.4.3.2 durchgeführten Ermittlung des optimalen Standortes der potenziellen Recyclingaktivität. Dabei ergibt sich zuerst eine Lösung für die Gesamtlänge aus der Summe aller Einzelfahrten für die Hin- und Rückfahrt zwischen jedem Knoten und der Zielanlage. Diese Ausgangslösung wird nun schrittweise versucht zu verbessern, indem unter den gegebenen kapazitätsbezogenen Restriktionen jeweils zwei Einzeltouren (anfänglich handelt es sich dabei ausschließlich um Pendeltouren) miteinander verbunden werden. Durch die Verknüpfung von beispielshalber zwei Pendeltouren werden in Summe zwei Fahrten zur / von der Zielanlage durch eine Direktverbindung zwischen den beiden betreffenden Knoten substituiert. Dies erfolgt jedoch nur, sofern die resultierende Strecke die Gesamtlösung verbessert. Aus der Substitution der Fahrten zwischen den Knoten und der Zielanlage durch die Direktverbindung beider Knoten lassen sich potenzielle Einsparungen (engl.: savings) berechnen, welche in einer Tabelle für alle möglichen Varianten sortiert werden. Beginnend mit dem größten „Saving“-Wert werden die Knoten entsprechend der tabellarischen Ordnung nun zu Einzeltouren zusammengefasst, bis tourenintern die fahrzeugabhängigen Abbruchkriterien erreicht sind.

5.6.1.3 Zirkelmethode

Ein nicht ganz so populärer Ansatz ist die sogenannte Zirkelmethode. Dabei handelt es sich um ein sequenzielles Verfahren, welches wiederum zuerst einen potenziellen Tourenplan konstruiert und anschließend die so generierten Einzeltouren mittels TSP-Optimierungsansätzen verbessert. Grundlegend wird zur Tourenkonstruktion um jeden Knoten ein Kreis gezogen, der initial nur jenen Ausgangsknoten selbst umschließt. Nachfolgend werden die Kreise soweit vergrößert, dass allgemach weitere Knoten von den Kreisen mit umschlossen werden. Dabei können einzelne Knoten Teilmengen mehrerer Kreise bilden. Abbruchkriterium der Vergrößerung der jeweiligen Kreise ist wiederum die Ladekapazität oder die Fahrzeitrestriktion der Fahrzeuge. Anschließend werden alle Kreise dem Durchmesser nach geordnet und beginnend mit dem kleinsten zu Touren zusammengefasst, bis alle Knoten einer Tour zugewiesen sind.

5.6.1.4 Neuere Ansätze und weitere Aspekte

Neuere Ansätze sind neben rechnergestützten Tourenplanungssystemen vor allem genetische Algorithmen, künstlich neuronale Netze, Fuzzy-Logik und Tabu Search Heuristiken. Eine Hauptproblematik stellt dabei jedoch die mangelnde Berücksichtigung abrupt und möglicherweise temporär auftretender Beeinflussungen der grundsätzlichen Rahmenbedingungen dar. Hierzu können sowohl kurz- und langfristige Veränderungen der Infrastruktur wie beispielhalber Stau, Baumaßnahmen oder Unfälle zählen, als auch Veränderungen der Planungsdaten oder der Auftragslage. Gleichwohl ist es schwierig saisonale Schwankungen in der Angebotsmenge, wie sie bei Altmodulen aufgrund von Defekten auftreten (vgl. Kapitel 5.2.1.2: „Abfallaufkommen kurz vor und während der Nutzungsphase“), adäquat einzubinden. Hierfür müssten kontinuierliche Tourenplanungsprozesse stattfinden, die jeweils die aktuelle Datenlage beachten. Ein Lösungsansatz dahingehend bieten moderne Datenverarbeitungssysteme und rechnergestützte Optimierungsmodelle beziehungsweise –softwarelösungen, welche diese Funktion sinnvoll und mit angemessenem Aufwand erfüllen.

Mit der Erhöhung der Anzahl an Recyclingaktivitäten in definierten regionalen Grenzen überschneiden sich zunehmend die einzelnen Optimierungsansätze zur Standortwahl und Tourenplanung. Dies erschwert die Suche sowohl nach dem einzelbetriebswirtschaftlichen als auch dem systemischen Kostenoptimum. Ähnlich verhält es sich, wenn anstelle

einer weiteren Recyclinganlage eine Sortieranlage oder ein Zwischenlager Bestandteil der Redistributionslogistik wird. Neben der Errichtung weiterer Recyclinganlagen kommt der Integrierung solcher zusätzlichen Maßnahmen jedoch erst mit dem Eintreten der Massenströme in der langfristigen Planungsphase Relevanz zu, da das Gros der Altmodule bei stark steigenden Mengen zum einen nicht mehr beim Hersteller und damit sortenrein oder teilsortiert als Produktionsausschuss anfällt und die steigenden Mengen zum anderen überhaupt erst ein Netzwerk verschiedener Akteure der Redistributionslogistik ermöglichen. Zudem zeigte die bisherige Diskussion, dass sich regionalspezifisch ohnedem erst mit dem stark ansteigenden Altmodulaufkommen eine Erhöhung der Anlagenzahl auch betriebswirtschaftlich lohnen kann, was eines der grundlegenden Initiierungskriterien darstellt.

5.6.2 Langfristige Planungspahse

Mit dem Eintreten der Massenströme kristalliner Siliziumsolaraltmodule, welche selbst auf regionaler Ebene örtlich und zeitlich diffus anfallen, gestaltet sich das Netzwerk der Redistributionslogistik wesentlich umfangreicher verglichen zur kurz- und mittelfristigen Planungsphase mit lediglich einem regionalen Standort – unabhängig ob innerhalb bestimmter regionaler Grenzen weitere Recyclinganlagen installiert, Zwischenlager errichtet oder andere Akteure wie beispielshalber externe Sortierer integriert werden. Einerseits sind sodann für alle Einzelaktivitäten Optimierungsmaßnahmen zur Ermittlung des betriebswirtschaftlichen Optimums notwendig. Bei gegebenen Verfahrenskosten begreift dies die Minimierung der Sammel- und Transportkosten infolge der Standortoptimierung, der zugehörigen Auslegung des Fuhrparks und der darauf aufbauenden Tourenplanung, sowie innerbetriebliche Optimierungen hinsichtlich eines Bestandsmanagements, eines Lagerhaltungsansatzes et cetera mit ein. Andererseits würde sich auch eine Optimierung der systemischen Sammel- und Transportkosten positiv auswirken, was beispielshalber eine Informationsoptimierung zur Steuerung der Supply Chain, ein optimales Vertragsdesign, eine unternehmensübergreifende Bestandsplanung, möglicherweise Collaborative Planning sowie ein übergeordnetes Transportmanagement und eine akteursübergreifende Standortoptimierung beinhaltet. Es können sich folglich Spannungsfelder zwischen betriebswirtschaftlichen Optimierungen der Einzelaktivitäten und dem gesamtsystemischen Optimum ergeben, vor allem bei der Verteilung der Aktivitäten auf mehrere Akteure.

Auf der betriebswirtschaftlichen Ebene der Einzelaktivitäten bleibt der fundamentale Ansatz nahezu gleich, ausgenommen der Berücksichtigung der Effekte und Wechselwirkungen, welche sich durch die weiteren Marktteilnehmer ergeben. Wesentlich komplexer gestaltet sich indessen eine Optimierung aus systemischer Sicht oder im Falle eines Akteurs, der mehrere netzwerkrelevante Aktivitäten vereint und sonach sein betriebswirtschaftliches Optimum dem systemischen entspricht. Wie vorbezeichnet, sind dementsprechend relevante und wahrscheinliche Sachverhalte, welche unabhängig der Anzahl der Akteure innerhalb definierter regionaler Grenzen gelten, die Initiierung einer weiteren oder mehrerer Recyclingaktivitäten, die Nutzung eines Zwischenlagers und die Integrierung einer Sortieranlage. Mögliche Effekte und Optimierungsansätze dieser drei realen Szenarien sollen nun nachfolgend sukzessive diskutiert werden.

5.6.2.1 Erhöhung der Anlagenzahl

Wird die Anzahl der Recyclingaktivitäten erhöht, ähnelt die Standortwahl einem Center Problem – genauer einem p-center Problem, wobei p in diesem Falle die geplante Höchstzahl regional zu betreibender Anlagen definiert. Grundlage der Standortoptimierung bildet wiederum die Kenntnis der relevanten Netzwerknoten in der betrachteten Region. Hierzu zählen in der langfristigen Planungsphase zuvörderst die Übergabestellen der örE; Produktionsausschüsse spielen eine untergeordnete Rolle. Wichtig sind in diesem Zusammenhang deren geographische Lokalisierung und die darauf aufbauende Ermittlung der kürzesten (oder besten) Wege zwischen allen Knoten, beispielshalber mittels des Dijkstra-Algorithmus. Alle Einzelverbindungen sind in einer quadratischen Matrix darzustellen. Anschließend werden die zeilenspezifischen Maxima zusammengetragen, woraufhin das kleinste dieser maximalen Entfernungen den optimalen Standort einer einzelnen Anlage kennzeichnet. Soll eine zweite Recyclinganlage in der gleichen Bezugsregion errichtet werden, muss folgende Bedingung erfüllt sein. Jeder Knoten, der Altmodule in das Entsorgungssystem einbringt, muss an mindestens einen Recyclingstandort transportwirtschaftlich angeschlossen werden. Eine grundlegende Heuristik zur Generierung der optimalen Standorte ist laut [Bierwirth 2009] die Gitternetz-Heuristik. Zudem kann über sogenannte Covering-Location Probleme (kurz: CLP) ein Mindestserviceniveau, dass durch die einzurichtenden Anlagen eingehalten werden soll, definiert werden. Im vorliegenden Fall ist jedoch von einem Maximal-Covering-Location Problem (kurz: MCLP) auszugehen, was ein Serviceniveau von 100 % fordert und im Ergebnis zu

einer strengen Aufteilung der Einzugsgebiete führt. Wird zudem eine brancheninterne Rückführung, egal ob aus einem Recycling zur Verwertung oder einem Recycling zur Verwendung, zugrunde gelegt, ist von einem bipartiden Netzwerk auszugehen. In diesem Fall kann eine Standortwahl auch mittels einer ganzzahligen linearen Optimierung erfolgen, wobei die Zielfunktion die Sammel- und Transportkosten, die Transportkosten der Rezyklierung, die Investitionskosten und potenzielle Zukaufkosten beinhalten. Die Nebenbedingungen umfassen größtenteils Input-Output-Beziehungen und Nichtnegativitätsbedingungen. Bei dann fixierten Anlagenstandorten kann im Falle eines bipartiden Netzwerkes eine übergreifende und systemische Optimierung der Güterströme angeschlossen werden. Dies dient der optimalen Verteilung der Mengenströme auf die Anlagen einer Bezugsregion, wobei dies sowohl hinsichtlich ökonomischer Aspekte (wie beispielshalber Transportkosten) als auch hinsichtlich ökologischer Gesichtspunkte geschehen kann. Mit Fokus auf die Minimierung der systemischen Sammel- und Transportkosten kann bei anlagenübergreifender Optimierung die effiziente Zuordnung von örtlichen Altmodulaufkommen zu den jeweiligen Recyclinganlagen gewährleistet werden. Dies ist vor allem dann möglich, wenn entweder ein Akteur mehrere Recyclingstandorte in der definierten Region betreibt oder wenn mehrerer Anlagenbetreiber im Sinne eines regionalen Netzwerkverbundes das Konzept des Collaborative Planning implementieren. Diese kostenminimale Zuordnung erfolgt über zwei Schritte: ein Eröffnungsverfahren und ein Verbesserungsverfahren. Notwendige Bedingung ist dabei, dass das Angebot an $gSSM_{alt}$ mindestens so hoch ist wie die Summe der Recyclingkapazitäten. Datengrundlage ist eine Transportkostenmatrix mit Zuordnung der Anlagenkapazitäten in den einzelnen Spalten. Als Eröffnungsverfahren bietet sich in solch einem Fall die Nordwest-Eckenregel an. Aufbauend auf deren Ergebnissen wird ein Verbesserungsverfahren zur Ermittlung des systemischen Minimums angewandt: die Stepping Stone Methode zur Identifikation etwaiger Opportunitätskosten. Alternativ kann auch ein weiteres heuristisches Verfahren genutzt werden, was beide Teilschritte kombiniert: die Vogelsche Approximationsmethode (Methode des größten Bedauerns). Die Erläuterung der einzelnen Verfahrensschritte aller beschriebenen Ansätze wäre jedoch nicht zielführend, weshalb der interessierte Leser hierfür wiederum auf [Vahrenkamp 2003] verwiesen wird.

5.6.2.2 Integrierung einer Sortieranlage

Aufgrund der mit Eintreten der Massenströme sich ändernden Rahmenbedingungen kann unter Umstände die Integrierung einer speziellen Vorsortier-, Vorbehandlungs- oder Trennungsanlage notwendig werden. In der langfristigen Planungsphase ist der Hauptaltmodulstrom auf $gSSM_{alt}$ am Ende der Nutzungsphase zurückzuführen, welche ob der Inkludierung von Photovoltaikmodulen in den Geltungsbereich des ElektroG2 im Gros bei den örE anfallen. Allerdings kann infolge der gemeinsamen Sammlung aller am Markt verfügbaren Module der gesamten Photovoltaiktechnologie nicht wie im kurzfristigen Szenario und den dort dominierenden Produktionsausschüssen von einem sortenreinen Anfall ausgegangen werden. Wie die gesamte vorgelagerte Diskussion dieser Arbeit, ausgehend vom Kapitel 3 zu den Solarzellentechnologien, gezeigt hat, kann ein hochwertiges $Recycling_{VR}$ oder $Recycling_{VN}$ für kristalline Siliziumsolaraltmodule keine Dünnschichtmodule oder sonstige Konzepte als Protzessinput nutzen. Dies gilt analog umgekehrt für potenzielle Recycler von Dünnschichtmodulen wie beispielshalber CdTe-Module. Eine unbeabsichtigte Mitbehandlung könnte zu erheblichen Schäden an der Verfahrenstechnik führen oder Umweltprobleme zeitigen, da sowohl die Prozesse als auch die Sekundärmaßnahmen nicht für die entsprechenden Schadstofffrachten ausgelegt sind. Dieserhalb wird eine Vorsortierung der Altmodule notwendig, was entweder bei den Sammel- oder Übergabestellen direkt oder bei eigens zwischengelagerten Sortieranlagen erfolgen kann. Unabhängig welches der beiden Konzepte für die Sortierung zugrunde gelegt wird, sind zusätzliche aber fundamentale Maßnahmen erforderlich. Für die Trennung von Altmodulen nach den Technologieklassen ist beispielshalber entweder der Einsatz von speziell geschultem Personal, ein Labeling der Module oder die Etablierung einer verfahrenstechnischen Lösung desiderat. Soll eine eigens vorgelagerte Sortieranlage in die Kreislaufführung integriert werden, wird wiederum eine Standortoptimierung zur Minimierung der systemischen Sammel- und Transportkosten notwendig. Hierfür bieten sich die Ansätze zur Optimierung von Maximal-Covering-Location Problemen an, welche zudem die Erfüllung eines möglichst hohen Servicelevels gewährleisten. Gleichwohl können diese Ansätze auch, bei umgekehrter Betrachtungsweise, die desiderate Anzahl an regionalen Sortieranlagen zur Erreichung eines gegebenen Servicelevels generieren. Bei dieser „externen“ Lösung kann die Sortieranlage im idealisierten Sinne für die Tourenplanung oder etwaige transportwirtschaftliche Entscheidungen auch als Zwischenlager mit all seinen Konsequenzen angesehen werden.

5.6.2.3 Nutzung eines Zwischenlagers

Die Nutzung eines Zwischenlagers kann aus transportwirtschaftlicher Sicht systemisch einige Vorteile mit sich bringen, wenngleich der Betrieb und die Einrichtung zusätzliche Kosten generieren. Die Integrierung eines solchen Netzwerkknotens in die Redistributionslogistik kann indessen auf unterschiedliche Formen erfolgen. Zum einen kann eine Konsolidierung der Transportleistung für einzelne regionale Ballungsräume mehrerer Bezugsquellen durch die Einrichtung von Zwischenlagern je Cluster oder durch regional integrierte Sortieranlagen mit Zwischenlagerfunktion je Cluster erreicht werden.

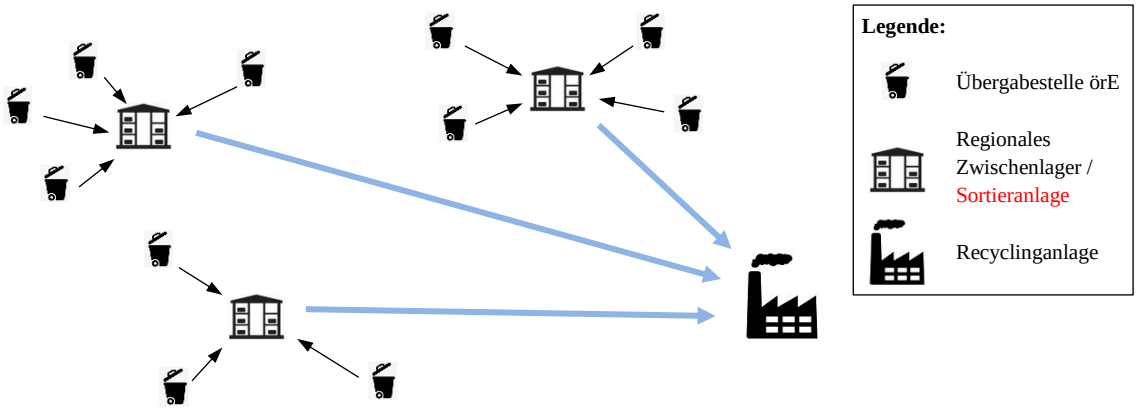


Abbildung 5-44: Konsolidierung der Haupttransportströme über Zwischenlager.

Wenngleich mit diesem Ansatz die Haupttransportleistungen gebündelt werden können und so ein differenzierter Einsatz adäquater Transportmittel in Abhängigkeit der jeweiligen Gegebenheiten ermöglicht wird, stellt dies gleichzeitig den ansatzspezifischen Nachteil dar: es handelt sich ausschließlich um eine einseitig konsolidierte Sammellogistik, was sowohl auf den Hauptläufen zwischen Recycler und Zwischenlager/ Sortierer als auch zwischen Sortierer und Übergabestelle leere Rückfahrten zeitigt.

Eine andere Möglichkeit ist die Errichtung eines zentralen Lagers oder einer zentralen Sortierstation. Vorteil hier ist die Möglichkeit das gesamte regionale Altmodulaufkommen bedarfsoptimal und zentral gesteuert auf die regional betriebenen Recyclingaktivitäten zu verteilen. Dies macht vor allem Sinn, wenn es sich dabei um lediglich einen Sortierer handelt. Dieser kann sowohl die einzelnen Technologien trennen, als auch die Güte der Altmodule für ein Recycling zur Verwertung und ein Recycling zur Verwendung unterscheiden und entsprechend zuteilen. Zudem können so saisonale wie örtliche Schwankungen am Altmodulaufkommen abgefedert werden, was die Optimierung der systemischen Kosten begünstigt.

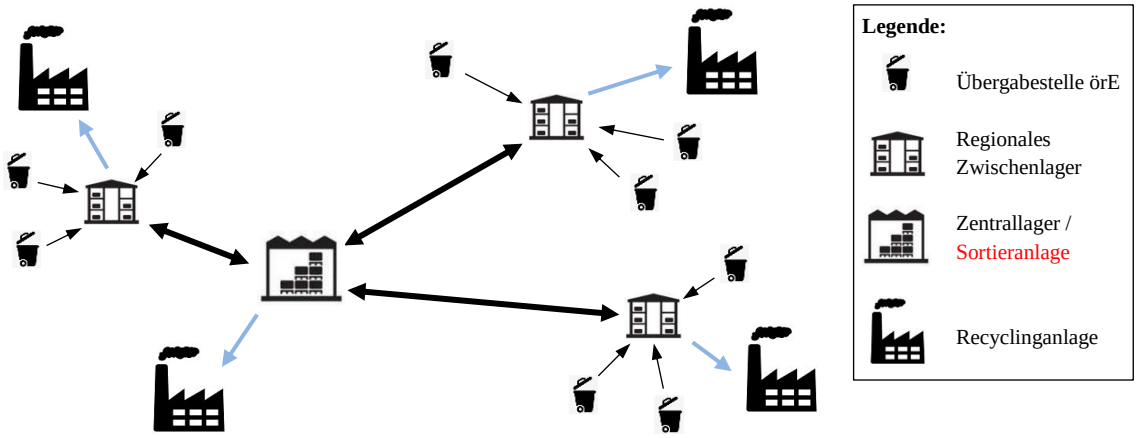


Abbildung 5-45: Konsolidierung der Transportleistung und Verteilung der regionalen Altmodulaufkommen mittels eines Zentrallagers oder zentralen Sortierbetriebes.

Durch den Transport zwischen den Regionallagern und dem Zentrallager in beide Richtungen entstehen auf den Hauptläufen keine Leerfahrten. Allerdings zeigt sich als entscheidender Nachteil eine erhöhte Gesamttransportleistung, da Module unter Umständen zweimal die gleiche Strecke (jedoch in unterschiedliche Richtung) zurücklegen, was sowohl ökonomisch als auch ökologisch disputabel ist. Hinzu kommen noch die Summe der Kosten des Zentrallagers und der Zwischenlager. Alternativ können auch verschiedene regional ansässige Sortierer die Aufgabe eines zentralen Sortierers oder eines Zentrallagers virtuell bündeln. Hierfür bieten sich speditionelle Netze oder sogenannte Nabe-Speiche Netzwerke an.

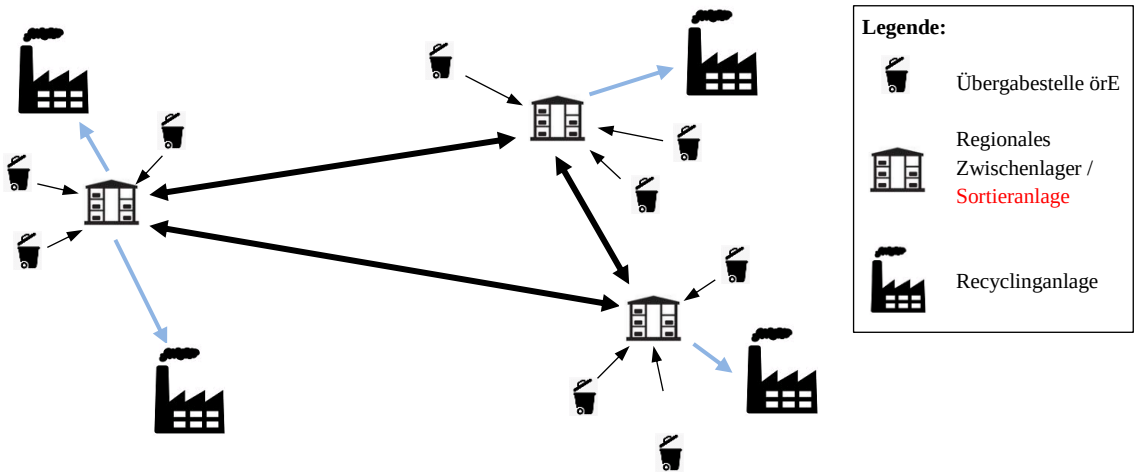


Abbildung 5-46: Konsolidierung der Transportleistung und Verteilung der regionalen Altmodulaufkommen über Nabe-Speiche Netzwerke.

Vorteil dieser Nabe-Speicher Netzwerke sind die geringeren Kosten ob der Vermeidung von Leerfahrten und der Absenz eines Zentrallagers bei gleichen Vorteilen bezüglich der optimalen Verteilung der regionalen Altmodulströme, obschon diese örtlichen und zeitlichen Schwankungen in Qualität und Quantität unterliegen. Zudem ist eine

Verringerung der Organisationslast möglich, da eine Taktung der Verteilungsfahrten möglich wird. Weiter kann die Beteiligung branchenexterne Akteure am Transportnetz die Stückkosten senken und die Auslastung der Hauptläufe optimieren. Grundsätzlich zeitigen Nabe-Speiche Netzwerke eine Transportkonsolidierung, was sich in einer Kostendegression sowohl aufgrund der Verkehrsverdichtung auf den Speichen (economies of density) als auch infolge des Potenzials zum Einsatz von Fahrzeugen größerer Nutzlasten (economies of scale) äußert. [Bierwirth 2009]

5.6.2.4 Weitere Aspekte

Die Umsetzung und systemkostenoptimalen Ausrichtung der vorbenannten Maßnahmen erschwert sich je mehr Akteure in solch einem Netzwerk teilnehmen. Liegen der Betrieb der regionalen Zwischenlager, der Sortieranlagen und der Recyclingstandorte in einer Verantwortung, kann die Verwaltung und die Anpassung zentral organisiert werden, wodurch sich die systemische Optimierung wieder auf eine betriebswirtschaftliche Problemstellung reduziert. Ist dies indessen nicht der Fall, sind zur Koordination der Supply Chain und der darauf aufbauenden systemischen Optimierung Ansätze wie Collaborative Planning und ein sinnvoll ausgerichtetes Vertragsdesign zwingend notwendig. Durch die Nutzung von Werkzeugen wie übergreifende Lagerhaltungssysteme oder ein gemeinsames Bestandsmanagement als reale Maßnahmen, kann dies mitunter von den Netzwerkteilnehmern ein Abweichen vom eigenen betriebswirtschaftlichen Optimum bedeuten, die Reduzierung unternehmerischer Freiheiten zeitigen oder den Austausch sensibler Daten erfordern.

Ein weiterer Ansatz, der sich von den vorbezeichneten Varianten absetzt, ist die Nutzung mobiler Recyclinganlagen. Dieser unter dem Namen PV MOREDE bekannte Ansatz wurde bereits im Kapitel 5.3.8: „Weitere Recyclingverfahren und -ansätze“ diskutiert. Vorteil wären ob der örtlichen Flexibilität die Nähe zum Ort des Altmodulaufkommens und gleichzeitig zum Absatzmarkt der Outputfraktionen. So sollen kleinere Altmodulmengen nahezu „on demand“ behandelt werden können [La Mia Energia SCARL 2015b]. In Summe würden die Kosten für Zwischen- oder Zentrallager entfallen. Gleiches gilt für die gesamte Transportlogistik. Dieser Ansatz ist jedoch nicht für die Bewältigung großer Altmodulmengen, wie in der langfristigen Planungsphase zu erwarten, geeignet, da die Durchsätze und die spezifische Anlagenkapazität einer Kontaineranlage zu gering ausfallen.

5.6.3 Regionales Recyclingnetzwerk und sonstige Effekte

Unabhängig der geplanten Anlagenzahl, der Form der Integrierung von Sortieranlagen, der Nutzung eines Zwischenlagers oder der Gestaltung der Konsolidierung der Transportströme sollte die Zeitspanne bis zum Eintreten der Massenströme (lokal, regional, national oder kontinental) für eine sinnvoll gestaltete strategische Netzwerkplanung genutzt werden. Dies kann besonders im regionalen Rahmen einen Standortvorteil zeitigen. Dazu ist neben der Planung der Ausgestaltung des Netzwerkes auf der Top Ebene (übergreifende Standortplanung) auch die Planung der Netzwerkunternehmen auf untergeordneten Ebene notwendig, was zentrale Aspekte wie die Optimierung der Kapazitäten der Einzelanlagen einbegreift. In toto handelt es sich um die grundlegende Infrastrukturplanung im Supply Chain Management unter Beachtung des systemischen Maximums mit dem Ziel der Generierung und Ausrichtung einer wettbewerbsfähigen Verwendungs- oder Verwertungskette. Dies zielt gleichwohl auch auf etwaige Überlegungen zur Ausgestaltung einer potenziellen Kontraktlogistik ab. In diesem Zusammenhang sind auch Workflow-Integrationsprozesse zur Verbesserung der Fahrzeugauslastung, der Verkürzung der Auftragszeiten und der zeitlichen Justierung der gesamten Redistributionslogistik zu beachten.

Zur übergreifenden strategischen Netzwerkplanung und der Dimensionierung der notwendigen Kapazitäten auf allen Ebenen eines potenziellen regionalen Recyclingnetzwerkes ist der zu erwartende Altmodulstrom in seiner quantitativen und qualitativen Ausprägung samt etwaiger saisonaler und räumlicher Schwankungen zu prognostizieren. Hierfür kann das in dieser Arbeit im Kapitel 5.2 entworfene Prognosemodell auf die jeweiligen regionalen Gegebenheiten hin angepasst werden. So können beispielshalber die zu erwartenden technologiespezifischen annuellen Altmodulströme je Landkreis prognostiziert werden; je nach Datenqualität der historischen Anlageninstallationen und Schätzgüte der zukünftigen Neuinstallationen kann dies darüber hinaus sogar auch auf lokaler Ebene für die Einzugsgebiete der jeweiligen Sammelstellen der örE erfolgen. Solch eine Feinprognose ermöglicht in der Konsequenz neben der Ermittlung der desideraten Anlagenanzahl, -kapazitäten und -spezifikationen auch eine auf die regionalspezifisch existente Infrastruktur ausgerichtete Optimierung der einzelnen Netzwerkbestandteile.

Sollten sich bei der räumlichen Analyse für die langfristige Planungsphase möglicherweise potente Cluster ergeben, die ein ausreichendes Altmodulaufkommen für ein eigenes Recyclingnetzwerk aufweisen und zugleich ein Produzent kristalliner Siliziumsolarmodule ansässig ist, kann zumindest vorerst auf theoretischer Betrachtungsebene das Konzept des regionalen Recyclingnetzwerkes weiter zugespitzt werden zu sogenannten Solarfabrikationsparks. Diese sind bisher zwar nur durch die räumliche Konzentration der gesamten produktionsseitigen Wertschöpfungskette von der Polysiliziumherstellung über die Glasproduktion bis hin zur Modulfertigung definiert, können aber mit dem Durchsetzen ökonomisch leistungsfähiger und zugleich ökologisch hochwertiger Recyclingaktivitäten um jenen Bestandteil ergänzt werden. Dieses Gedankenspiel ufert letztlich in der potenziellen Vereinigung von Produktion und Recycling an einem Standort, ähnlich des in [centrotherm photovoltaics AG 2009] bezeichneten produktionsseitigen Konzeptes der Grid-Parity-Fabrik. Laut [Behrendt 2010, S. 26] spart dieser produktionsbezogene Ansatz sowohl Transportkosten und -leistung als auch Verpackung und die benötigten Margen der Zwischenstufen. Darüber hinaus ist auch von sinkenden Bruchraten der Wafer und Zellen infolge eines nicht standortübergreifenden Transportvorganges auszugehen. Wird nun ein Recycling in dieses Konzept integriert, kann zugleich ein produktionsinternes Recycling erfolgen und an die spezifischen Bedürfnisse angepasst werden. Zudem können, in Abhängigkeit der integrierten Produktionsstufen und der Form des Recyclings (Wiederverwendung oder Wiederverwertung), die gewonnenen Outputfraktionen aus dem Recyclingverfahren direkt in der Produktion eingesetzt werden. Dies spart wiederum Transportkosten und -leistung. Weiter können sich Effekte einer gemeinsamen Nutzung und Entsorgung von Materialien, Energien und einer kombinierten Anlagentechnik positiv auf die gesamte Kostenstruktur auswirken – nicht zuletzt durch eine Senkung der Verfahrenskosten. Abgesehen von diesen beiden Sonderfällen ergibt sich aus der räumlichen Agglomeration der Standorte der einzelnen Aktivitäten eines regionalen Recyclingnetzwerkes für die jeweiligen Akteure laut [Posch 2006, S. 26] die Möglichkeit, die regional vorhandenen Potenziale und Ressourcen zugunsten einer gestärkten Wettbewerbsfähigkeit aller Teilnehmer bedarfsgerecht zu nutzen. Dies soll neben der Generierung eines Marktes für spezialisierte Arbeitskräfte auch die Ansiedlung weiterer speziell auf diese Wertschöpfungskette ausgerichteter Hersteller und Dienstleister sowie einen leichteren und qualitativ besseren Wissenstransfer zwischen den einzelnen Akteuren des regionalen Recyclingnetzwerkes beinhalten.

Allerdings handelt es sich realiter nur in exzeptionellen Fällen um ein langfristig geplantes idealtypisches Netzwerk. Vielmehr ist von einer Evolution des Netzwerkes auszugehen, dass sich an die Anforderungen der steigenden Altmodulströme allgemach anpasst. Beginnend mit einem Kristallisationskeim [Schwarz 1998, S.11] in Form einer Recyclingaktivität, die je nach den Gegebenheiten in der mittelfristigen oder langfristigen Planungsphase an einem kostenminimalen Standort initiiert wird, können mit Eintreten der Massenströme weitere Recyclingaktivitäten oder andere Akteure der Recyclingkette zustoßen. Zudem ist davon auszugehen, dass sich bei einer bereits ausgebildeten oder gegebenen Recyclinginfrastruktur auch ein Sortierer ansiedelt (externer Akteur), sofern ein ökonomischer Bedarf zu verzeichnen ist und eine Sortierung der Altmodule nicht bereits auf den Sammel- oder Übergabestellen der örE betrieben wird. Im Falle eines geplanten Recyclingnetzwerkes kann auch eine Erweiterung der Netzwerkinfrastruktur um eine oder mehrere Sortieranlagen gezielt erfolgen (interner Akteur), wenn dies die Besserstellung des gesamten Systems effiziert.

Letztlich ist ein Recyclingnetzwerk jedoch das Resultat rationaler Entscheidungen und ergibt sich marktgetrieben. Recycler, Sortierer oder sonstige Teilnehmer wählen ihren Standort zuvörderst nach rein ökonomischen Kriterien aus – sofern keine sonderlichen externen Effekte wirken. Grundlegend muss allerdings innerhalb der geplanten Bezugsregion der benötigte Prozessinput konstant verfügbar sein. Überdies wird der Standort der Anlage auf Basis betriebswirtschaftlicher Überlegungen gewählt, sodass der Prozessinput kostenminimal bezogen, verarbeitet und veräußert werden kann. In letzter Konsequenz wird die Investition in eine Recyclingaktivität auch nur dann / erst dann getätigt, wenn sich entsprechend der jeweiligen regionalen Rahmenbedingungen ein positiver Nettogegenwartswert für eine bestimmte desiderate Investitionssumme innerhalb einer vorgesehenen Laufzeit ergibt, wobei alle im Kapitel 5.4 diskutierten Einflussfaktoren relevant sind. Dies gilt gleichbedeutend für potenzielle Recyclingaktivitäten, Sortieranlagen, Transportdienstleistungen oder sonstige Teilnehmer.

Nach [Posch 2006, S. 102] gibt es indessen keine universell effizienten Netzwerkinfrastrukturen; zum Erhalt der Effizienz müssen die Netzwerkakteure ihre Strukturen an die jeweiligen Gegebenheiten immer wieder adaptieren. Allerdings ist diese Anpassungsfähigkeit eingeschränkt durch beispielhalber bereits getätigte Investitionen in eine spezialisierte Verfahrens- oder Anlagentechnik, die bei sich ändernden Rahmenbedingungen sogenannte versunkene Kosten zeitigen würden. Auch eine langfristig

ausgerichtete Partnerschaft oder strategische Vertragsbindungen können die Anpassungsgeschwindigkeit eines Netzwerkes erheblich beeinträchtigen. Hinzu kommt unter Umständen eine reduzierte Innovationsbereitschaft einzelner oder mehrerer Akteure des Netzwerkes. Dies ist laut [Posch 2006, S. 191] vor allem dann der Fall, wenn die Akteure des Netzwerkes ihre Prozesse aufeinander abgestimmt haben und eine Veränderung nur mit erheblichem monetären und koordinativen Aufwand möglich ist (sogenannter Lock-in-Effekt).

Ein funktionierendes Recyclingnetzwerk kann jedoch neben der direkten Rückstandsweitergabe oder dem regionalen Komponentenbezug auch weitere positive Effekte oder Wettbewerbsvorteile für regional ansässige Produzenten zeitigen. Großes Potenzial ist in diesem Zusammenhang auch einer mitunter vorteilhaften Auswirkung auf die Vermarktung der Module zuzuschreiben. Dies zielt besonders auf die Erschließung neuer umweltbewusster Zielgruppen, auf eine mögliche Steigerung der Motivation der Mitarbeiter oder das Potenzial, für „ökologische“ Produkte höhere Absatzpreise zu etablieren, ab. [Haas und Schlesinger 2007, Seite 42] Letzteres kann beispielshalber die Folge einer umweltorientierten Markenpolitik eines Herstellers sein, der sich durch die Nutzung regional anfallender Sekundärrohstoffe ausdrücklich und öffentlichkeitswirksam von der Konkurrenz abhebt. Dies ist in besonderem Maße mit dem Begriff „Triple Green“ für eine nachhaltige Produktion, einen schadstofffreien Betrieb sowie ein umfassendes und ökologisch sinnvolles Recycling verbunden, der zumindest in anderen Branchen bereits Einzug gefunden hat und dem steigenden Bedürfnis oder der erhöhten Nachfrage nach „ökologischen“ Produkten gerecht werden soll.

Abschließend sei an dieser Stelle noch der in Deutschland unter dem Namen PV Cycle tätige Industrieverband erwähnt. Dieser könnte mit dem Einsetzen der prognostizierten Massenströme die Aufgabe eines Dachverbandes oder Koordinators etwaiger nationaler Recyclingstrukturen übernehmen. So ist mit der Bündelung der strategischen Netzwerkplanung eine systemoptimale und kostenminimale Gesamtlösung anzustreben. Weiter kann durch eine solche zentrale Verwaltungsstelle die brancheninterne Verteilung der Altmodule optimiert werden und die Planung und Auslegung potenzieller regionaler Recyclingnetzwerke, sofern ökonomisch sinnvoll, erfolgen. Wenngleich bisher jedenfalls nicht öffentlich zugänglich geschehen, sollte dies jedoch zumindest der Anspruch sein.

KAPITEL 6

IDENTIFIZIERTE HERAUS-FORDERUNGEN UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

Dieses Kapitel soll abschließend die in den vorangegangenen Abschnitten aufgedeckten Hemmnisfaktoren sowie die dargelegten und andiskutierten Problematiken, welche die gegenwärtige Disproportionalität zwischen zur Verfügung stehender Technologie und realem Anwendungsspektrum ökologisch hochwertiger Recyclinglösungen für kristalline Siliziumsolaraltmodule effizieren, in gebündelter Form zusammentragen und dem entsprechenden Diskussionsgegenstand zuordnen. Um unnötige Dopplungen zu vermeiden, wird an gegebener Stelle jeweils auf die direkt behandelnden Kapitel verwiesen; dies soll den Modus Procedendi in diesem Abschnitt darstellen. Gleichwohl werden aber auch Risiken und Chancen, die aus einem potenziellen Betrieb einer Recyclingaktivität im regionalen Bezugsrahmen hervorgehen, adressiert. Zudem soll der auf diesen Erkenntnissen weiter aufbauende Forschungsbedarf benannt und umrissen werden. Hier stehen auch die volkswirtschaftlichen Effekte eines regionalen Betriebs im Fokus, was in der grundsätzlichen Frage nach der Stabilität eines sich ergebenden Sekundärrohstoffmarktes ufert. Unter Umständen ist sonach auch die Notwendigkeit des Einsatzes ordnungsrechtlicher und marktorientierter Instrumente zu prüfen.

Kapitelfeingliederung

6.1 Problematik der Zeitverschiebung zwischen Produktions- und Recyclingtechnologien 647
6.2 Problematik der fehlenden Volumina 651
6.3 Weitere identifizierte Hemmnisfaktoren und Herausforderungen 655
6.3.1 Rechtliche Ebene 655
6.3.1.1 Fehlende stoffliche Anreize 655
6.3.1.2 Erweiterte Kennzeichnung 657
6.3.1.3 Produktverantwortung 659
6.3.1.4 Sonstige Aspekte 661
6.3.2 Technische Ebene 662
6.3.2.1 Verfahrensinput 662
6.3.2.2 Verfahrensoutput 665
6.3.2.3 Sonstige Aspekte 667
6.3.3 Ökonomische Ebene 668
6.3.3.1 Nettogegenwartswert 668
6.3.3.2 Recyclingnetzwerk 671
6.3.3.3 Sonstige Aspekte 673
6.4 Regionaler Nutzen aus der Etablierung eines Recyclingnetzwerkes 675
6.4.1 Stärkung des ostdeutschen PV-Produktionsclusters 678
6.4.2 Schaffung einer Rohstoffsenke durch gezielten Altmodulimport 680
6.5 Volkswirtschaftliche Aspekte 683

6.1 Problematik der Zeitverschiebung zwischen Produktions- und Recyclingtechnologien

Potenzielle Recyclingaktivitäten, speziell ausgerichtet auf die kristalline Siliziumsolartechnologie, unterliegen einem unkalkulierbaren Risiko. Dies zielt nicht nur auf die stete innertechnologische Weiterentwicklung der Zellenkonzepte und der Modulkonzeptionen sowohl hinsichtlich der enthaltenen oder notwendigen Ingredienzien als auch auf die Art derer Verwendung und die grundlegende Dimensionierung ab, sondern umfasst auch technologieübergreifende Trends und die enorme Vielzahl unterschiedlicher Produkte. Zuvörderst bleibt festzuhalten, dass sich derzeit anfallende Altmodule aus Produktionsausschüssen im Aufbau sowie hinsichtlich der quantitativen und qualitativen Verwendung von Materialien grundlegend von ihren Pendants, die vor 10 oder 20 Jahren gefertigt wurden, und von zukünftigen Ausschussraten unterscheiden. Hinzu kommt die Überschneidung der gegenwärtigen Produktionsausschüsse mit Altmodulen am Ende der Nutzungsphase, welche zwar derzeit erst allgemach einen Beitrag zum regionalen Altmodulaufkommen zu leisten beginnen, jedoch technologisch den Produktionsstandard von vor 10 bis 20 Jahren entsprechen. Dieses Gedankenspiel lässt sich unter der Prämisse der fortwährenden Entwicklung der Technologie auch auf zukünftige Szenarien übertragen. Allerdings werden den Ausführungen des Kapitels 5.2 zur Prognose des möglichen Altmodulaufkommens nach mit Einsetzen der Massenströme (auch auf regionaler Ebene) die Produktionsausschüsse an Bedeutung verlieren oder vielmehr nur noch vernachlässigbar kleine Mengen zum gesamten Altmodulaufkommen beitragen, was die Überschneidung dieser beiden Teilbeiträge auf unterschiedlichem technologischem Niveau auf den ersten Blick irrelevant erscheinen lässt. In der Konsequenz werden aber auch die annuellen Altmodulströme sukzessive die zugrunde liegende Produktionshistorie widerspiegeln; und das aufgrund der inhomogenen Lebenserwartung nicht überschneidungsfrei. Speziell ausgerichtete Recyclingverfahren müssen folglich analog der Produktionstechnologien einen steten Wandel vollziehen beziehungsweise die Verfahrensparameter anpassen oder einen generellen Ansatz verfolgen. Etwaige generelle Ansätze sind jedoch zurzeit nicht in der Lage die ökonomisch werthaltigen Ingredienzien in der geforderten Qualität aus den Altmodulen zu gewinnen (vgl. Kapitel 5.3 und 5.4). Dahingegen sind spezialisierte Ansätze nur schwierig und mitunter kostenintensiv an die wechselnden Anforderungen, die mit einem inhomogenen Prozessinput

einhergehen, anzupassen beziehungsweise für die erforderlichen Spezifikationen der Outputfraktionen jeweils neu zu justieren. Dies bestätigt beispielshalber auch [Weckend *et al.* 2016, S. 81], worin es heißt: „All future recycling processes will need to keep abreast of ongoing cell and panel innovations to obtain the best possible results at acceptable costs."

Einzelne zu erwartende zukünftige Veränderungen, denen der entsprechenden Fachliteratur, wie beispielshalber [Cellere *et al.* 2016], [Green 2012] oder [Behrendt *et al.* 2010], nach zum sukzessiven Einzug in die Produktion neuer kristalliner Siliziumsolarmodule ein hohes Potenzial zukommt, wurden auf Zellenebene bereits in den Kapitel 3.3 und 4.4 ausführlich diskutiert. Besonders denen in Kapitel 3.3 ausgeführten Neuerungen der Hocheffizienzzellen ist zukünftig technologieintern ein erhöhter Marktanteil zuzuschreiben. Obschon die Leistungsfähigkeit dieser Konzepte bekannt ist und diese Ansätze zumindest labortechnisch erprobt sind, fanden sie bislang jedoch nur ansatzweise und vereinzelt in der kommerziellen Produktion Beachtung. Dies ist vor allem auf die damit verbundenen hohen Produktionsanforderungen und –kosten zur Integrierung in bestehende Produktionssequenzen zurückzuführen, was sich jedoch mit Voranschreiten der Produktionstechnologien und dem Einsatz neuer Verfahren und Materialien ex abrupto ändern kann. Etwaige darauf basierende Modifikationen auf Modulebene und weitere konstruktionsbedingte Einflüsse innerhalb der kristallinen Siliziumsolartechnologie wurden im Kapitel 5.5 untersucht. Diese zielten zwar vordergründig auf die Rentabilität einer potenziellen regional ansässigen Recyclingaktivität ab, behandelten aber auch daraus resultierende Schwierigkeiten für die Verfahrenstechnik. Die einzelnen Betrachtungsgegenstände sollen nun nicht nochmal angeführt werden, weshalb an dieser Stelle direkt auf das Kapitel 5.5 verwiesen wird. Allerdings ergibt sich eine Schnittmenge mit der hier behandelten Problematik der Zeitverschiebung von Produktions- und Recyclingtechnologien. Die mit der imponderablen sowie produktionskostengetriebenen Fortentwicklung der kristallinen Siliziumsolartechnologie und den daraus resultierenden möglichen zukünftigen Marktanteilen alternativer Konzepte einhergehenden unkalkulierbaren Risiken auf die ökonomische Leistungsfähigkeit einer potenziellen Recyclingaktivität wurden als bedeutender Hemmnisfaktor für die ausbleibende aber benötigte initiale Investition identifiziert. Dabei existiert jedoch zugleich auch eine Wechselwirkung mit weiteren und nicht minder bedeutenden Hemmnisfaktoren, Problematiken und Effekten.

Dieser Sachverhalt stellt sich technologieübergreifend entsprechend diffiziler dar; schon die Anzahl installierter und am Markt verfügbarer Modifikationen ist schlicht nicht greifbar. Wie im Kapitel 5.6.2.2 zur Notwendigkeit der Vorsortierung der Altmodule nach Technologiepfad bereits deutlich gemacht, ist eine Vermischung der einzelnen technologischen Ansätze (kristallines Silizium, Dünnschicht, CIS/CIGS et cetera) hinsichtlich eines ökologisch hochwertigen Recyclings nicht zielführend. Selbst bei geringwertigen und generellen Ansätzen im Sinne des Status quo führen die Belastungen aus den unterschiedlichen Technologien mit teils umweltschädlichen, gesundheitsgefährdenden oder gefährlichen Inhaltstoffen zu Problemen bei den Sekundärmaßnahmen oder zur Verunreinigung des Outputs der Recyclingverfahren. Dabei stellt nicht nur die technologieübergreifende enorme Anzahl unterschiedlicher Modulkonzepte eine Problematik dar, vielmehr ergeben sich die gleichen Schwierigkeiten wie innerhalb der kristallinen Siliziumsolartechnologie infolge der Fortentwicklung aller technologischen Ansätze. Hinzu kommt die Ungewissheit der zukünftigen Marktverteilung nicht nur der einzelnen Technologien, sondern auch technologieintern der einzelnen Konzeptionen. Diese Trends sind von den jeweiligen Entwicklungen in der Produktionstechnologie, dem erzielbaren Wirkungsgrad und den Produktionskosten getrieben, weshalb schon die generelle Abschätzung zukünftiger Marktanteile kaum möglich ist. Hinzu kommt, dass die Technologieentwicklung von imponderablen und unsteten Sprüngen gekennzeichnet sein kann. Dieser Aspekt wurde bereits in den Kapiteln 4.3 und 4.4 diskutiert, in welchen auch die derzeit verfügbaren Marktabschätzungen selbst renommierter Forscherkollegien und Verbände kritisch betrachtet wurden.

Darüber hinaus entstehen fortwährend neue Technologiepfade und Anwendungsfelder. Neuere Ansätze können mitunter zudem kürzere Lebenszyklen aufweisen und so schneller im Massenstrom anfallen. Dies kann letztlich wiederum einen zusätzlichen Anstieg der ohnehin schon enormen Produktvielfalt zur Konsequenz haben, was die Risiken eines potenziellen Recyclers nicht mindert – ohne dass deren Marktetablierung oder tatsächliches Verhalten zum jetzigen Stand der Wissenschaft vorausgesagt werden kann. Prominente Beispiele sind Farbstoffzellen, Solarmodule auf Basis von Perowskit, gebäudeintegrierte Photovoltaik, bifaciale oder flexible Solarmodule. Aber auch Mischtechniken wie Hybridabsorber zur Kombination von Photovoltaikmodulen und Sonnenkollektoren oder gedruckte Solarmodule können völlig neue Herausforderungen zeitigen.

Ein weiterer und enorm wichtiger Effekt, welcher sich aus der kostengetriebenen Fortentwicklung der Produktionstechnologie und des Layouts moderner Solarmodule auf Basis der kristallinen Siliziumsolartechnologie ergibt und auf potenzielle Recyclingaktivitäten wirkt, ist der im Kapitel 5.5.2 diskutierte Trend der Reduktion spezifischer Ingredienzien. Dies zielt wiederum nicht nur auf den dort beschriebenen Konnex zwischen ökonomischer Leistungsfähigkeit der Recyclingaktivitäten ob dadurch bedingter sinkender Absatzerlöse oder steigender Verfahrenskosten ab, sondern auch auf die damit einhergehenden neuartigen Anforderungen an die Verfahrenstechnik der Recyclinganlage und sich sonach ergebende notwendige Anpassungsmaßnahmen. Speziell der Trend hin zu immer dünneren Wafern und die daraus resultierenden steigenden Bruchraten können in besonderer Weise für ein $\text{Recycling}_{\text{VN}}$ ein enormes Risiko nach sich ziehen. Gleiches gilt uneingeschränkt für die sich bereits nach [Rubin 2010, S. 131] und [Sander *et al.* 2007] abzeichnende Veränderungen der Flächenkanten der zugrunde liegenden Wafer. Die Problematik, die mit dem Trend zu in der Fläche größeren Wafern einhergeht, zeitigt auch der genau umgekehrte Ansatz hin zur Verwendung halber Zellen. An dieser Stelle wird die Schwierigkeit, die aus der Zeitverschiebung der Produktionstechnologien und der mittels des Recyclings aktueller Altmodulströme generierbaren Outputfraktionen besonders hinsichtlich einer branchenininternen Wiederverwendung resultiert, ebenfalls deutlich greifbar. Vor allem die geforderten Spezifikationen der einzelnen Absatzmärkte in Verbindung mit der Variation des Prozessinputs können sonach ein hohes unternehmerisches Risiko effizieren.

In toto zeigt die Verschiebung sowohl zwischen aktuellen Produktionstechnologien und Recyclingtechnologien als auch zwischen der Zusammensetzung sowie dem Aufbau gegenwärtig anfallender Altmodule und derzeit neuproduzierter Pendants nicht nur in der kurzfristigen Planungsphase ein enormes Risiko für potenzielle Recyclingaktivitäten. Selbst bei möglicherweise bestehenden Strukturen in der langfristigen Planungsphase kann diese Problematik unkalkulierbare Risiken erzeugen, besonders im Zusammenhang mit der im Kapitel 5.6.3 beschriebenen potenziellen Anpassungsträgheit von Recyclingnetzwerken.

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Risiken, sind Recyclingprozesse, die inputseitig nur für einzelne Modulspezifikationen ausgelegt sind, weiteren Problematiken verstärkt ausgesetzt.

6.2 Problematik der fehlenden Volumina

Infolge der speziellen Auslegung der Verfahrenstechnik auf ein hochwertiges Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule können zwar potenzielle Erlöse generiert werden, die die Gesamtkosten übersteigen, der Markt verfügbarer Quellen reduziert sich jedoch ob der Spezialisierung nicht nur gesamtheitlich quantitativ, er kann aufgrund der regionalen Installationshistorie auch örtlich divergieren oder mitunter nur zeitlich befristet existent sein. Aus dem Konnex zwischen Wirtschaftlichkeit und stetem regionalen Altmodulaufkommen resultiert eine Überschneidung mit der zuvor behandelten Problematik, welche teils auf die kontinuierliche Fortentwicklung der gesamten Photovoltaiktechnologie zurückzuführen ist, und der charakteristischen regionalen Installationshistorie. Sonach ist der Standortsuche letztlich nicht nur eine generelle regionale Installationshistorie für die Prognose des zu erwartenden Altmodulaufkommens zugrunde zu legen, sondern, sofern möglich, eine detaillierte und auf den spezifischen Prozessinput ausgerichtete. Wenngleich dies im Kapitel 5.2.2 bei der Erstellung des Prognosemodells Beachtung fand, konnten lediglich technologiebereinigte Werte als Datenbasis generiert werden. Durch die Nutzung jener technologiebereinigten Werte konnten die Altmodulprognosen zumindest auf die kristalline Siliziumsolartechnologie eingegrenzt werden. Eine weitere Unterteilung innerhalb dieses Technologiepfades scheitert jedoch an der Verfügbarkeit und Existenz adäquater Daten, was separater Diskussionsgegenstand des Kapitels 6.3.1.2 ist. Neben der Verfügbarkeit qualitativ und quantitativ ausreichender Daten zur Installationshistorie zeigt sich auch die bereits des Öfteren benannte imponderable zukünftige Marktentwicklung sowohl hinsichtlich der annuellen Neuinstallationen als auch der Marktanteile der einzelnen Technologiepfade als Restriktion verlässlicher Prognosen, was sich mit steigendem Grad der Regionalisierung entsprechend zuspitzt. So kann speziell auf regionaler Ebene durchaus das Altmodulaufkommen spezifischer Technologiepfade mitunter zeitlich und örtlich eingeschränkt sein beziehungsweise sprunghaften Charakter aufweisen, woraus sich für einen einseitig ausgerichteten Recycler enorme wirtschaftliche Risiken ergeben. Diese sind nicht nur auf den damit einhergehenden Anpassungsbedarf der Verfahrenstechnik auf verfügbare Altmodulkonzeptionen (vgl. Kapitel 6.1) zurückzuführen, auch die Beschaffungslogistik und die zugehörigen Kosten werden dadurch beeinflusst. Ein Einbruch regional verfügbarer Inputquellen kann sowohl zu einer nicht ausgelasteten Anlagenkapazität samt aller wirtschaftlichen Folgen führen oder eine Ausweitung der Bezugsregion inklusiver einer

damit einhergehenden Steigerung der Sammel- und Transportkosten bedingen; beides Verbunden mit negativen betriebswirtschaftlichen Auswirkungen. Zu diesem generellen Risiko des Ausbleibens regional verfügbaren Prozessinputs unterliegt eine potenzielle Recyclingaktivität auch den Effekten saisonaler Schwankungen der Altmodulströme – besonders in der langfristigen Planungsphase. Dies geht darauf zurück, dass sich in der langfristigen Planungsphase der Hauptanteil des Massenstroms aus Altmodulen am Lebenszyklusende zusammensetzt. Den Kapiteln 5.2.1.2 und 5.2.1.3 nach existiert vor allem bezüglich des Aufkommens von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen aufgrund von Defekten und Repoweringmaßnahmen eine saisonale Korrelation zugunsten strahlungsintensiver Monate. Dies zieht in der Konsequenz eine entsprechende Lagerhaltung nach sich; wiederum verbunden mit Kosten. Optimiert eine zentrale Planungsstelle, wie im Kapitel 5.6 angedeutet, die gesamte Redistributionslogistik, kann sich bei einer Verteilung des regional und saisonal verfügbaren Altmodulaufkommens eine Losgrößenoptimierung zwischen allen Akteuren des Netzwerks ergeben. Dies kann dazu führen, dass die verfügbare Menge zwar systemoptimal verteilt wird, auf Ebene der Einzelaktivitäten jedoch eine kapazitive Teilauslastung resultiert. Neben saisonalen, technologieabhängigen oder regionalspezifischen Effekten können sich zudem reduzierte Rücklaufquoten negativ auf den zu erwartenden kristallinen Siliziumsolaraltmodulstrom auswirken.

Wie schon die Diskussion des Kapitels 5.4.5 zeigte, ist speziell in der Region des ostdeutschen PV-Produktionsclusters bereits in der kurzfristigen Planungsphase das annuelle Aufkommen kristalliner Siliziumsolaraltmodule einerseits hoch genug, damit für eine potenzielle Recyclingaktivität die pagatorischen Erlöse die pagatorischen Kosten übersteigen, andererseits jedoch noch zu niedrig, als dass eine Investition aus finanzmathematischer Sicht sinnvoll erscheint. Dieser identifizierte gegenwärtig wirkende Hemmnisfaktor könnte allerdings durch etwaige Verbundeffekte abgemildert oder gar egalisiert werden. Ziel solcher Strategien ist eine Erhöhung des regionalen Aufkommens an nutzbarem Prozessinput. Wenngleich sich für einen technologieübergreifenden Recyclingansatz die Menge an verfügbaren Altmodulen erhöht, entsteht wiederum eine betriebswirtschaftliche Diskrepanz. Zur Verkürzung der Break-evens des aktivitätsspezifischen Nettogegenwartswertes und damit einer verbesserten Ausgangssituation für eine Investition (vgl. Kapitel 5.4.5.3) dürfen infolge der Erhöhung der Durchsatzmengen entweder die Verfahrenskosten eines generellen Ansatzes zur Erzielung einer

zu einem spezialisierten Ansatz komparablen Qualität des Outputs nicht im gleichen Verhältnis wie die pagatorischen Gesamterlöse steigen oder die Verfahrenskosten müssen auf einem solch niedrigen Niveau liegen, dass der Überschuss trotz reduzierter Erlöse aus dem Absatz des qualitativ geringwertigeren Outputs trotzdem zunimmt. Die Reduzierung der Qualität des Prozessoutputs infolge einer Generalisierung des potenziellen Prozessinputs stellt simplifiziert den im Kapitel 5.3.1 diskutierten Status quo des Modulrecyclings dar und steht im Konflikt zu einem ökologisch sinnvollen Recycling, was auch die werthaltigen Funktionsmaterialien kristalliner Siliziumsolaraltmodule einbegreift. Sollte jedoch die Qualität der Outputfraktionen steigen und sich die Verfahrenskosten auf einem betriebswirtschaftlich moderaten und finanzmathematisch adäquaten Niveau bewegen, können diese Verbundeffekte (englisch: economies of scope) einen sinnvollen Ansatz zur Reduzierung des Hemmnisfaktors des derzeit noch zu geringen Altmodulaufkommens darstellen. Dieserhalb rücken Untersuchungen zu integrierten und kombinierten Recyclingtechnologien immer mehr in den Fokus der Forschung. Ziel sind dabei neben einer gemeinsamen Behandlung von kristallinen Siliziumsolaraltmodulen und Dünnschichtmodulen, beispielshalber auf Basis von Cadmiumtellurid oder der CIS/CIGS-Technologie, auch Prozesse zum gleichzeitigen Recycling von Photovoltaikmodulen, Displays und beschichteten Gläsern. [Behrendt *et al.* 2010] Laut [Cucchiella *et al.* 2015] ergeben sich daraus neue Geschäftsmodelle, die es separat zu untersuchen gilt. Darüber hinaus weist [Fthenakis 2000] auf mögliche Lerneffekte aus der Untersuchung der Wirtschaftlichkeit bereits bestehender Verfahren zum Multimaterialrecycling hin. Zudem kann die Einbindung solcher Expertisen die Planung und Entwicklung ökonomisch und ökologisch sinnvoller genereller Ansätze unterstützen oder gar beschleunigen. Diese Verbundeffekte stellen zumindest einen Teilaspekt des weiteren Forschungsbedarfs dar, besonders hinsichtlich der Steigerung der Wirtschaftlichkeit, aber auch mit Blick auf die langfristige Resilienz gegenüber der Auswirkung abrupter Marktumbrüche auf regionaler Ebene. Gleichwohl sind die derzeit ausstehenden Praxiserfahrungen von hoher Relevanz zur optimalen Auslegung und Anpassung der Verfahrenstechnik – unabhängig eines generellen oder spezialisierten Ansatzes.

In toto ist die Problematik der fehlenden Volumina jedoch nur ein zeitlich begrenzter, sprich temporärer Hemmnisfaktor. Mit Eintreten der Massenströme in der langfristigen Planungsphase und der Implementation neuer Erkenntnisse infolge intensivierter Forschung (betrifft auch ein mögliches recyclingorientiertes Moduldesign) ist den

Ergebnissen der Kapitel 5.4 und 5.5 zufolge davon auszugehen, dass sich die finanzmathematische Investitionsrestriktion positiv gestaltet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Break-evens der Nettogegenwartswerte ob der aus dem stark erhöhtem Altmodulaufkommen resultierenden Steigerung der Wirtschaftlichkeit einer potenziellen Recyclingaktivität für eine Vielzahl denkbarer Kombinationen aus Investitionssumme, Kalkulationszins und Laufzeit eine etwaige Investitionsentscheidung begünstigen – und zwar in solch einem Maße, dass dies sowohl auf regionaler Ebene als auch für technologiespezifische und ökologisch sinnvolle Ansätze Gültigkeit besitzt.

Allerdings ergeben sich, wie bereits mehrfach erwähnt, Wechselwirkungen mit der Problematik der Zeitverschiebung durch die imponderable Marktentwicklung. Ein Marktumbruch hin zu alternativen Ansätzen innerhalb der Photovoltaiktechnologie oder gar zugunsten alternativer Energiequellen kann das benötigte Altmodulaufkommen allgemach unter die desiderate Mindestmenge eines wirtschaftlichen Anlagenbetriebs schrumpfen lassen. Sollte solch ein Umbruch darüber hinaus vor dem Eintreten der Massenströme absehbar sein, kann dies eine Investition trotz einer Empfehlung aus finanzmathematischer Sicht verhindern und so als Hemmnisfaktor wirken.

6.3 Weitere identifizierte Hemmnisfaktoren und Herausforderungen

Analog den beiden direkt vorstehenden Unterkapiteln 6.1 und 6.2 ist eine überschneidungsfreie Betrachtung weiterer identifizierter Hemmnisfaktoren und Herausforderungen sowie sich daraus ergebender Risiken und Chancen nicht vollends möglich. Wenngleich die Struktur dieses Unterkapitels formal zwar eine strikte Trennung suggeriert, kann mitunter besonders den bestehenden Wechselwirkungen zwischen zwei oder mehreren Teilaspekten verschiedener Rubriken essenzieller Charakter zukommen. Die betreffende Diskussion ist dann der Rubrik zugeordnet, die am ehesten dem jeweiligen Grundtenor gerecht wird. Dadurch können jedoch vereinzelt Teilaspekte sowie etwaige Lösungsstrategien, eventuelle Auswirkungen oder mögliche Potenziale doppelt aufgegriffen werden.

6.3.1 Rechtliche Ebene

Die einzelnen relevanten Betrachtungen dieser Rubrik stützen sich im Gros auf den Inhalt des Kapitels 5.1, wobei speziell den nationalen gesetzlichen Restriktionen um das KrWG und das ElektroG2 ein zentraler Stellenwert als Diskussionsgrundlage zukommt.

6.3.1.1 Fehlende stoffliche Anreize

Die im § 22 Absatz 1 Nummer 2 des ElektroG2 für den Zeitraum zwischen dem 15. August 2015 und dem 14. August 2018 festgelegten Mindestzielvorgaben eines 70 %-igen Recyclinganteils und für den offenen Anwendungsbereich ab dem 15. August 2018 mit der Erhöhung dieser Mindestquoten als Resultat der Neuordnung der Geräteklassen nach Artikel 3 Nummer 1 und Nummer 11 in Verbindung mit der Umgestaltung des § 22 Absatz 1 nach Artikel 3 Nummer 7 Buchstabe a des ElektroG2 auf einen Recyclinganteil von 80 % der zugehörigen Gerätekategorie sind hinsichtlich eines ökologisch sinnvollen sowie hochwertigen Recyclingansatz für kristalline Siliziumsolaraltmodule als zu niedrig zu bewerten. Diese Behauptung soll nun nachfolgend mittels eines Vergleiches der Mindestquote mit dem generellen Aufbau eines $gSSM_{alt}$ substanziiert werden. Wird selbst die höhere der beiden Mindestquoten eines Recyclinganteils von

80 % zugrunde gelegt, wird der Tabelle 4-28 (Kapitel 4.5.6.1, Seite 290) nach bereits mit dem Recycling der Frontverglasung und der Aluminiumrahmung die geforderte Mindestzielvorgabe übertroffen. Der Gesetzgeber verfehlt dementsprechend mittels dieser mengenbasierten Quoten (vgl. Kapitel 5.1.1 und 5.1.2) die Möglichkeit einen außermonetären Anreiz zu setzen und den bestehenden Status quo der Behandlung zugunsten eines hochwertigen Recyclings, welches neben den Massenwerkstoffen auch die Funktionsmaterialien einbegreift, zu verändern. Dies ist besonders dahingehend von Relevanz, als dass damit alle bereits diskutierten ökologischen und ökonomischen Vorteile einer Kreislaufführung von beispielshalber des in der Raffination energieintensiven Siliziums oder im Falle eines $Recycling_{VN}$ bei der Vereinzelung der bislang nur unter hohen abrasiven Materialverlusten herzustellenden Siliziumrohwafer nicht gefördert werden. Allerdings bleibt festzuhalten, dass es sich bei diesen Mindestanteilen nicht um geräteartspezifische, sondern um kategoriebasierte Quoten handelt. Um ein Recycling der Funktionsmaterialien eines $gSSM_{alt}$ mit einzubegreifen, bedarf es indessen einer entsprechend höheren Forderung. Dies kann jedoch kategorieintern zu Problemen bei den weiteren Gerätearten führen. Es ist daher zu prüfen, ob eine gezielte und ambitionierte Erhöhung der Recyclingquote für alle Gerätearten der betreffenden Kategorie möglich ist, oder ob eine weitere Differenzierung dieser Kategorie zielführend wäre. Eine getrennte Erfassung der geräteartabhängigen Quoten speziell für Photovoltaikmodule würde tendenziell keinen erheblichen Mehraufwand effizieren, da Photovoltaikmodule nach § 14 Absatz 1 ElekrtoG2 ohnehin in einer eigenen Sammelgruppe (Gruppe 6) getrennt zu sammeln und zur Abholung bereitzustellen sind. Zudem kann auch der Einsatz gezielter stoffbezogener Quoten einen Anreiz auf rechtlicher Ebene zur Etablierung hochwertiger Recyclinglösungen bewirken. Gegen letztgenannte Strategie spricht jedoch die enorme Vielzahl am Markt verfügbarer und bereits installierter Produktvarianten mit erheblichen Unterschieden in der stofflichen Zusammensetzung. Obendrein können auch die im Kapitel 6.1 diskutierten Probleme, die mit einer sich fortwährend entwickelnden Technologie einhergehen, diesbezüglich Nachteile zeitigen. Andererseits können infolge von ambitionierten stoffspezifischen Recyclingquoten auch zweckgerichtete Impulse für zukünftige Modulkonzeptionen gesetzt werden. Dies gilt es ebenfalls im Zuge weiterer Forschungsaktivitäten zu prüfen.

Für die potenzielle Strategie der Erhöhung der kategoriebezogenen Mindestanforderungen oder der geräteartspezifischen Recyclinganteile ist hingegen zu beachten, dass bei den kristallinen Standardsiliziumsolarmodulen aufgrund der Laminierung per se kein vollumfängliches stoffliches Recycling möglich ist. Dieser ob der Verbundfolien auftretende Verlust kann jedoch mittels eines entsprechend angepassten Moduldesigns minimiert werden. Hier gilt es die nach § 23 KrWG geforderten Pflichten der Produktverantwortung umzusetzen. Auch ein marketinggetriebener erweiterter Aufwand einzelner Hersteller kann hier ein Umdenken anstoßen, beispielsweise durch den Einsatz eines recyclingorientierten Moduldesigns. Gleichwohl wäre auf rechtlicher Ebene auch eine Straffung weiterer relevanter Gesetze dienlich. Vor allem aus Betreibersicht einer potenziellen Recyclingaktivität wäre in diesem Zusammenhang eine Einschränkung zur Verwendung der fluorhaltigen Rückseitenfolie zu begrüßen, da dies die Verfahrenskosten eines Recyclings durch den Einsatz weniger aufwändig zu betreibender Sekundärmaßnahmen senken kann – unabhängig davon, welche der im Kapitel 5.5.1 aufgeführten Modifikationen dann letztlich Einsatz findet. Grundlegend ist hierfür zuvörderst die Präklusion von Photovoltaikmodulen nach § 1 Absatz 2 Nummer 9 der ElektroStoffV aufzuheben, bevor die fluorhaltigen Folien in den Anwendungsbereich der ElektroStoffV eingebunden werden können. Dies hätte zudem den Effekt, dass die Verwendung bleihaltiger Lötlegierungen ebenfalls den Einschränkungen der ElektroStoffV unterliegen würde.

6.3.1.2 Erweiterte Kennzeichnung

Grundlegend hat die erweiterte Kennzeichnung von Photovoltaikmodulen zusätzlich zur Kennzeichnungspflicht nach § 9 Absatz 2 ElektroG2 (mit Symbol der durchgestrichenen Mülltonne) zum Ziel, einen additionalen Informationslayer zu generieren. Dieser sollte neben dem substanziellen Modulaufbau auch das verwendete Zellendesign, die Dotierung der Waferbasis sowie das Herkunftsland und das Fertigungsdatum beinhalten. Die positiven Effekte daraus gestalten sich mannigfaltig und wirken sich auf verschiedenste Bereiche des Recyclings aus. Eine technologiespezifische Kennzeichnung der Module selbst hätte zum Beispiel den Vorteil, dass die jeweiligen Modultypen schon während der Sammlung getrennt gehalten und somit den entsprechenden etwaigen Recyclingprozessen ohne eine zusätzliche Sortierung (Zwischenstufe) zugeführt werden könnten. Zudem würden sich so Module, die umweltrelevante oder gefährliche Ingredienzien

beinhalten, unkompliziert identifizieren lassen. Allerdings ist nicht nur eine Unterscheidung der Technologieklassen in kristalline Siliziumsolarmodule, Dünnschichtmodule oder sonstige Konzepte notwendig, vielmehr sollte auch eine Differenzierung innerhalb der Technologieklassen erfolgen. Würden beispielshalber auch die grundlegende Modulkonzeption und das integrierte Zellendesign mit angegeben, hätte dies vor allem positive Auswirkungen auf die Recyclingprozesse und sonach auch auf die zugehörigen Verfahrenskosten. Dies begründet sich darin, dass sich so die Effizienz der Recyclingprozesse ob einer erleichterten Batchzusammenstellung steigern ließe. Hinzu kommt, dass sich speziell bei Recyclingprozessen, die ein Ätzverfahren zur Gewinnung gereinigter kristalliner Siliziumsolarrohwafer oder –rohwaferbruchs nutzen, die Möglichkeit einer zielgenauen und schnelleren Anpassung der Verfahrensparameter wie die Zusammensetzung der einzelnen Ätzbäder, deren Reihenfolge und die jeweilige Ätzdauer erschließt (vgl. Kapitel 5.3). Des Weiteren sollte im Zuge des bereits ausführlich im Kapitel 6.1 abermals aufgegriffenen und zukünftig zu erwartenden Marktumbruchs besonders im Falle der kristallinen Siliziumsolartechnologie eine Kennzeichnung der Dotierung der Basis erfolgen. Laut [Cellere *et al.* 2016, S. 29] ist davon auszugehen, dass kristalline Siliziumsolarzellen mit einer n-dotierten Basis in Zukunft sukzessive Marktanteile zugewinnen. Diese unterscheiden sich im Aufbau kaum oder nur vereinzelt von ihren p-dotierten Pendants, was eine Identifizierung sowohl vor als auch nach dem Recycling in Form gereinigter Rohwafer kaum ermöglicht. Dies ist für einen Recycler jedoch von essenzieller Bedeutung und betrifft neben der notwendigen Anpassung der Verfahrensparameter zur Qualitätssicherung in fundamentaler Weise die Kenntnis über die Spezifikationen des eigens generierten Prozessoutputs.

Neben dem Nutzen für potenzielle Recyclingaktivitäten ergeben sich aus einer erweiterten Kennzeichnung auch positive Effekte für Prognosemodelle des zukünftigen Altmodulaufkommens sowie für Statistiken und desiderate Erfahrungswerte bezüglich des neuralgischen Verhaltens kristalliner Siliziumsolarmodule. Werden die eingangs dieses Kapitels aufgeführten Parameter des Herkunftslandes und des Fertigungsdatums mit in die erweiterte Kennzeichnung einbezogen, lassen sich Rückschlüsse über das reale Langzeitverhalten direkt aus der Anwendungspraxis ermitteln. Dies stellt vor allem für die Grundlagenforschung einen erheblichen Mehrwert dar, da aus diesen zusätzlichen Informationen verschiedenste Kombinationen an Einflüssen und Parametern untersucht werden könnten. So kann beispielshalber die im Kapitel 5.2.1.2 diskutierte, von Experten

aufgestellte, aber bisher nicht wissenschaftlich korrekt nachweisbare Behauptung eines Konnexes zwischen Fertigungsort und Langzeitverhalten gezielt untersucht werden. Wie angedeutet, zeigen sich infolge der Aufnahme aller genannten Parameter in eine erweiterte Kennzeichnung positive Effekte für die Genauigkeit und die Güte etwaiger Prognosemodelle des zukünftigen Altmodulaufkommens. So kann nicht nur eine genauere technologiespezifische Lokalisierung der Altmodule erfolgen (würde eine weitere Regionalisierung des Prognosemodells zulassen), es wäre auch eine anlagenspezifische Zuordnung des jeweiligen Alters möglich. Mit steigender Informationsdichte und fortschreitendem Wissensstand, besonders über das Langzeitverhalten installierter Module unterschiedlicher Spezifikationen, ergeben sich zudem positive Auswirkungen auf die gesamte Rückführungslogistik. Werden diese genannten Informationslayer obendrein mit der Meldepflicht für Neuanlagen obligatorisch verbunden, kann auf Basis dieser Daten ein Recyclingpotenzialkataster erstellt werden. Eine Verknüpfung der Daten eines etwaigen Recyclingpotenzialkatasters mit der erweiterten Kennzeichnung der Module würde die Möglichkeit eröffnen, genau zu bestimmen, welche Module aktuell noch installiert sind, welche hochwahrscheinlich zeitnah in welcher Region anfallen und welche einem Recycling bereits zugeführt wurden und so das System verlassen haben. Für nähere Ausführungen hierzu wird auf Kapitel 5.2.2.5 verwiesen. In diesem Zusammenhang gilt es jedoch zu prüfen, ob und in welcher Form eine erweiterte Datenakquise im Zuge der Meldepflicht für Neuanlagen sowohl zulässig als auch zumutbar ist.

6.3.1.3 Produktverantwortung

Aus der Perspektive eines potenziellen Recyclers wäre die konsequente Umsetzung der Produktverantwortung nach Teil 3 des KrWG durch die Produzenten kristalliner Siliziumsolarmodule wünschenswert. Für die Erläuterung der Paragraphen 23 bis 27 des KrWG und dem Konnex zur Photovoltaik wird an dieser Stelle auf die Ausführungen des Kapitels 5.1.2 verwiesen. Dieserhalb werden hinsichtlich der hier angestrebten Diskussion nur die relevanten Teilaspekte herausgegriffen, was neben der grundlegenden abfallvermeidenden Gestaltungspflicht die Nummern 1 und 2 des zweiten Absatzes vom § 23 des KrWG einbegreift. So ergibt sich nach § 23 Absatz 2 Nummer 2 KrWG eine Nutzungspriorisierung von Sekundärrohstoffen oder verwertbaren Abfällen bei der Fertigung kristalliner Siliziumsolarmodule, was unter technischer, wirtschaftlicher und sozialer Zumutbarkeit einen Anreiz zum Recycling von Photovoltaikmodulen allgemein,

besonders jedoch zum Wiedereinsatz von auf dieserart gewonnenen Rohstoffen setzt. In Verbindung mit § 8 Absatz 1 Satz 1 KrWG ist darüber hinaus ein $Recycling_{VN}$ zur Wiederverwendung von kristallinen Rohwafern, oder im optimalen Fall und unter jener Einschränkung der wirtschaftlichen, technischen und sozialen Zumutbarkeit von p-dotierten, texturierten Siliziumwafern einem $Recycling_{VR}$ vorzuziehen. Unabhängig von der Wahl der Recyclingform würde aus einer verpflichtenden brancheninternen Rezyklierung bereits durch die Einsparung des entsprechenden Anteils der energieintensiven Siliziumraffination ein erheblicher ökologischer Nutzen resultieren. Weitere Vorteile alleinig aus der Wiederverwendung oder –verwertung der kristallinen Altzellen sind zentraler Diskussionsgegenstand des Kapitels 5.3.9, beziehungsweise in Tabelle 5-15, Seite 506 komprimiert auf energetische und stoffliche Einsparpotenziale dargestellt. Eine konsequente Umsetzung würde folglich nicht nur positive Effekt für die Produzenten und die Recycler effizieren, es ergäbe sich auch ein systemischer Nutzen. Für Produzenten kristalliner Siliziumsolarmodule wäre sonach infolge der Nutzung der Einsparpotenziale eine Senkung der Produktionskosten realisierbar. Zudem kann aus der Verwendung solcher Sekundärrohstoffe auch das Marketing profitieren, da so eine weitere „Vergrünung“ des Produktes und damit eine Abgrenzung zu anderen Herstellern möglich wäre (Stichwort: „triple green“). Für Recycler würde sich die Markteintrittsbarriere deutlich senken, da diese, je nach Auslegung des zugrunde liegenden Verfahrens, genau die gewünschten Spezifikationen des brancheninternen Absatzmarktes bedienen können. Auch zur branchenexternen Weiterverwertung oder Weiterverwendung (teilweise) kann so ein Anreiz zum erhöhten Bedarf und in der Folge einem breiteren Markt entstehen. In toto würden somit die Absatzpotenziale der generierten Outputfraktionen steigen. Für beide Akteure, Produzenten und Recycler, zeigen sich demnach entsprechend auch ökonomische Vorteile – was letztlich den größten Anreiz zur Initiierung einer hochwertigen Recyclingaktivität darstellt. Der systemische Nutzen resultiert aus den ökologischen Benefits infolge des Einsatzes der Sekundärrohstoffe, besonders bei einer brancheninternen Wiederverwendung (vgl. Tabelle 5-15, Seite 506), sowie der Generierung des sich daraus ergebenden ökonomisch getriebenen Anreizes zur Etablierung etwaiger Recyclingnetzwerke.

Aus der Nummer 1 des zweiten Absatzes des § 23 KrWG ergibt sich hingegen das bereits des Öfteren erwähnte Spannungsfeld zwischen Langlebigkeit, recyclingorientierten Moduldesign und Produktionskosten. Dies gilt zwar für die gesamte Laminierungs-

schicht, zuvörderst jedoch hinsichtlich der verwendeten fluorhaltigen Verbundfolien auf der Modulrückseite. Einerseits ist die Laminierung des Modulverbundes für eine Langlebigkeit und die global uneingeschränkte Einsatzbarkeit der Module (derzeit) essenziell, andererseits stellt dies genau den über die gesamte Arbeit beschriebenen technischen und ökonomischen „Flaschenhals“ des Recyclings dar. Wenngleich eine Vielzahl unterschiedlicher Strategien zur Konfliktlösung entweder bereits existieren oder in der Erprobung sind, scheitert die Anpassung des Moduldesigns jedoch im Gros an der ökonomischen Umsetzbarkeit sowie resultierenden Einbußen im Wirkungsgrad. Der potenzielle Maßnahmenkatalog zur Realisierung der Produktverantwortung nach § 23 Absatz 2 Nummer 1 für kristalline Standardsiliziumsolarmodule lässt sich allerdings unter einem Begriff zusammenfassen: dem recyclingorientierten Moduldesign. Für eine detaillierte Diskussion diesbezüglich wird auf Kapitel 5.5.1 verwiesen, welches die einzelnen Aspekte, Ansätze und ökonomischen Auswirkungen umfassend diskutiert.

6.3.1.4 Sonstige Aspekte

Eine weitere Herausforderung ist die Implementierung der WEEE2 in die nationale Gesetzgebung der einzelnen EU-Mitgliedsstaaten. Wenngleich diese europäische Richtlinie einen mehr oder weniger deutlichen Rahmen vorgibt, kann deren Interpretation von Staat zu Staat unterschiedlich ausfallen. Dies kann die Etablierung eines transnationalen Systems oder Recyclingnetzwerkes hemmen, da es das transnationale Recycling beeinträchtigt oder einen Mehraufwand zur Integrierung aller ländertypischen Spezifika bedarf. Zudem wurde die europäische Richtlinie bisher nicht in allen Mitgliedsstaaten vollends in nationales Recht überführt, weshalb die einzelnen nationalspezifischen Obliegenheiten nicht eindeutig benannt werden können. Dieserhalb ergibt sich speziell hinsichtlich eines transnationalen Recyclingnetzwerkes beziehungsweise für den Altmodulimport aus Anrainerstaaten ein entsprechender Forschungsbedarf.

Gleichwohl gilt es laut [Fthenakis 2000] zu prüfen, ob eine Aberkennung der Abfalleigenschaft für kristalline Siliziumsolaraltmodule und eine Deklarierung als beispielhalber gebrauchte Produkte zulässig ist und inwieweit dies überhaupt einen positiven Effekt zeitigen kann. Vorstellbar ist demnach die Senkung von Kosten infolge einer dann womöglich reduzierten Anforderung an die Handhabung solcher Altmodule. Dies gilt jedoch nicht für etwaige verfahrenstechnische Restriktionen, welche davon unberührt bleiben.

6.3.2 Technische Ebene

Ähnlich der rechtlichen Ebene der weiteren identifizierten Herausforderungen stützen sich die einzelnen Betrachtungen dieses Unterkapitels auf die Erkenntnisse und Zusammenhänge vorangegangener Ausführungen – insbesondere jedoch auf die Inhalte und Diskussionen der Kapitel 5.2 bis 5.5.

6.3.2.1 Verfahrensinput

Ein zentrales und betrachtungsebenenübergreifendes Problem sind die fehlenden Erfahrungswerte über die tatsächliche Lebenserwartung kristalliner Siliziumsolarmodule unterschiedlicher Spezifikationen und Fertigungszeiträume unter realen Einsatzbedingungen. Dies beinhaltet nicht nur die Frage nach dem faktischen Langzeitverhalten, sondern auch die Unkenntnis verschiedenster Zusammenhänge wie beispielhalber das neuralgische Verhalten in Abhängigkeit des Herkunftslandes und des Zeitraumes der Fertigung, die Wechselwirkung verschiedener Defektarten oder die Wahl der Lage- und Formparameter der Weibullverteilungsfunktion zur Beschreibung einer adäquaten Absterbekurve. Wenngleich erste Daten über Belastungstest generiert werden, zeigt sich an dieser Stelle ein erheblicher Forschungsbedarf, nicht zuletzt zur Verbesserung der prekären Datenlage. Grundlagenwissen, wie das Langzeitverhalten oder eine wissenschaftlich fundierte Annahme zur durchschnittlichen Lebenserwartung, würde sich auf alle Ebenen der beschriebenen Aspekte dieser Arbeit positiv auswirken. Dabei ist anzumerken, dass die enorme Vielzahl der verfügbaren Produktvariationen diesbezüglich ebenfalls negative Auswirkungen zeitigt. So entstehen allgemach, mit Voranschreiten der Installationshistorie, zwar erste Erfahrungswerte aus dem realen Einsatz, diese sind jedoch nicht vollumfänglich auf alle Modulkonzeptionen übertragbar. Viel gewichtiger ist in diesem Zusammenhang jedoch wiederum die im Kapitel 6.1 diskutierte Problematik der Zeitverschiebung. Obschon davon auszugehen ist, dass zeitnah erste Altmodule durch das Erreichen des Lebensendes infolge altersbedingter Defekte anfallen, unterscheiden sich jene grundlegend im Aufbau von derzeit neuinstallierten Modulen. Die Erfahrungen und Daten, die mit den Altmodulen, welche beispielshalber vor 20 Jahren installiert wurden, gesammelt werden können, sind folglich nicht auf die Fertigung, die zu erwartende Lebensdauer oder das neuralgische Verhalten aktueller Varianten übertragbar. Steigende Erfahrungswerte und die Existenz qualitativ und quantitativ umfassender

Daten würde sich indessen entscheidend auf das vorhandene Grundlagenwissen auswirken. Ein Resultat daraus wäre die Möglichkeit, etwaige Prognosemodelle wesentlich zu präzisieren, indem etwa das Langzeitverhalten verschiedener Modulgenerationen einbezogen werden kann (zum Vergleich: in der vorliegenden Arbeit wurde eine Zweiteilung des Verhaltens diktiert)[174]; allerdings nur für die historischen Installationen. Eine Prädiktion auf zukünftige Modulmodifikationen bliebe letztlich trotzdem schwierig und auf Annahmen basierend. Eine Folge präziserer Prognosemodelle wäre eine Senkung vor allem der ökonomischen Risiken, denen ein potenzieller Recycler derzeit unterliegt, da die Bestimmtheit und die desiderate Verlässlichkeit eines steten zu erwartenden annuellen Altmodulaufkommens und damit des regional verfügbaren Prozessinputs steigt.

Ein weiterer Aspekt, der mit der verfügbaren Menge adäquaten Prozessinputs speziell für Recyclingaktivitäten zur Verwendung zusammenhängt, ist die Verbesserung der Deinstallation sowie der Redistributionslogistik zur Vermeidung von zusätzlichen Schäden am Altmodul nach Seite 490 bis 492 (Kapitel 5.3.9). Besonders das auf den ersten Blick ökonomisch leistungsfähigere $Recycling_{VN}$ (vgl. Kapitel 5.4.6) unterliegt hohen wirtschaftlichen Risiken infolge einer Reduktion des desideraten Prozessinputs bei einem unter Umständen regional begrenzten Altmodulaufkommen. Im Vergleich zum $Recycling_{VR}$ ist der verfügbare Prozessinput nach Kapitel 5.4.5 durch die verschiedenen Defektarten ohnehin um den Faktor F_a gemindert, weshalb ungeplante oder vermeidbare weitere Minderungen entsprechend höher ins Gewicht fallen. Eine Verhinderung von Schäden am oder im Modul infolge der Redistribution geht in der Konsequenz auf den Einsatz geeignete Transportmittel, -behälter und -sicherungen sowie eine angemessene Verladung, Stapelung und Lagerung der Module zurück. Hier steht besonders das Bewusstsein der entsprechenden Mitarbeiter sowie deren adäquate Ausbildung im Fokus. Gleiches trifft auf vermeidbare Schäden infolge unsachgemäßer Deinstallationen von Altanlagen zu. Hierfür ist ein fachmännischer Umgang ebenso wichtig, wie zur ordnungsgemäßen und schadfreien Anlageninstallation (vgl. Kapitel 5.2.1.2).

[174] Mithilfe einer entsprechenden Datenbasis könnte diese Zweiteilung wesentlich feiner ausfallen, wobei sich jedoch letztlich die Frage der Sinnhaftigkeit einer zu umfassenden Differenzierung stellt.

Sind die Altmodule einmal deinstalliert, steht aus verfahrenstechnischer Sicht wiederum die Sortierung der Module nach prozessierbarem Input der spezifischen Recyclingansätze im Mittelpunkt. Wie bereits angeführt, sind für die Trennung der Altmodule nach den Technologieklassen oder gar innerhalb der Technologieklassen verschiedene Ansätze denkbar, vor allem jedoch der Einsatz von speziell geschultem Personal, eine erweiterte Kennzeichnung der Module (Kapitel 6.3.1.2) oder die Etablierung einer verfahrenstechnischen Lösung. Insbesondere der erweiterten Kennzeichnung ist dabei ein hohes Potenzial zuzuschreiben, da dies im Gegensatz zum Einsatz hochqualifizierten Personals oder der Entwicklung einer verfahrenstechnischen Lösung (soweit überhaupt realisierbar) nur vernachlässigbar geringe Zusatzkosten effizieren würde. Die Notwendigkeit der Trennung des Prozessinputs für einen ökologisch hochwertigen Recyclingansatz ist den Ausführungen dieser Arbeit folgend als gegeben anzusehen und soll nicht nochmal aufgegriffen werden. Gleiches gilt für die des Öfteren diskutierte Technologiediversität, welcher in Produktdatenbanken wie beispielshalber dem Solarmodulverzeichnis von [ENF Ltd. 2016] jederzeit selbst nachgegangen werden kann. Allerdings sei erwähnt, dass sich eine Möglichkeit zur Reduzierung etwaiger daraus ergebender ökonomischer Risiken im Konzept der Produkttypung findet. Dieser Ansatz ist Gegenstand des Kapitels 5.5.3.

Wenngleich eigentlich eine ökonomische Auswirkung zeitigend, geht die in diesem Absatz diskutierte Beeinflussung auf eine technische Anpassungsmaßnahme zurück: die Etablierung eines recyclingorientierten Moduldesigns nach Kapitel 5.5.1. Ziel ist eine Reduzierung der Verfahrenskosten und damit die Reduktion ökonomischer Risiken infolge der Anpassung des Modulaufbaus. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei, in Verbindung mit der Produktverantwortung (Kapitel 6.3.1.3), auf der Substitution oder Eliminierung der fluorhaltigen Rückseitenfolie. Dies kann eine Senkung der Verfahrenskosten ob geringerer Anforderungen an den Betrieb der Sekundärmaßnahmen bewirken. Darüber hinaus ist eine fast ausschließliche stoffliche Verwertung durch gezielte recyclingorientierte Anpassungsmaßnahmen wie mittels der kunststofffreien Verkapselung zumindest theoretisch denkbar. Dies hätte vor allem den Vorteil, dass der thermische Verfahrensschritt der Pyrolyse des Modulverbundes samt notwendiger Sekundärmaßnahmen gänzlich entfallen könnte, was wiederum einen enormen Effekt auf die Verfahrenskosten und damit die ökonomischen Risiken einer potenziellen Recyclingaktivität hätte.

6.3.2.2 Verfahrensoutput

Bei der Betrachtung der Outputfraktionen der einzelnen Recyclingansätze auf technischer Ebene steht vordergründig der Konflikt zwischen der Qualität des Outputs, möglicher erzielbarer Absatzerlöse und notwendiger Verfahrenskosten im Mittelpunkt. Der Konnex zwischen Qualität, erzielbaren Absatzerlösen und den zugehörigen Absatzmärkten wurde bereits im Kapitel 5.4.2.2 ausführlich diskutiert, weshalb diesbezüglich direkt auf den betreffenden Abschnitt zu verweisen ist. Die Qualität der einzelnen Outputfraktionen wird indessen prinzipiell durch die Wahl der Verfahrensparameter entscheidend beeinflusst. Allerdings kann eine Optimierung jener Faktoren sowohl hinsichtlich eines hochwertigen Outputs erfolgen, es kann aber auch eine kostengetriebene Optimierung angestrebt werden. Wird diese Betrachtung an das Minimal-Maximal-Prinzip angelehnt, resultieren folgende Zielvorgaben:

- Minimalprinzip: Minimiere die Verfahrenskosten bei gleichbleibender Qualität.
- Maximalprinzip: Maximiere die Qualität zur Erhöhung der potenziellen Absatzerlöse bei gleichbleibenden Kosten, wobei eine Erhöhung der Qualität der Outputfraktionen nicht uneingeschränkt mit einem erhöhten Absatzerlös verbunden ist. Die entsprechenden Absatzmärkte müssen erstens vorhanden und zweitens (regional)[175] zugänglich sein.

Realiter steht hingegen zumeist eine Mischform beider Ziele im Fokus (Extremumprinzip), wobei jedoch vor allem auf der Reduktion der Kosten das Hauptaugenmerk liegt. Wie bereits erwähnt, basiert sowohl eine qualitative Anpassung der Outputfraktionen als auch eine Minderung der Verfahrenskosten im Gros, ausgenommen externe Einflüsse wie beispielshalber sinkende Strompreise oder sinkende Beschaffungspreise notwendiger Betriebsstoffe et cetera, auf der Anpassung der verfahrenstechnischen Parameter; deshalb ist die Diskussion der technischen Ebene zugeordnet. Es gilt daher die potenziellen verfahrenstechnischen Anpassungsmaßnahmen auf mögliche ökonomische Folgen hin genauer zu untersuchen – auch in einem regionalen Kontext. Daraus lässt sich beispielshalber folgender Forschungsbedarf ableiten: Welcher Aufwand ist generell zu betreiben, um den Anforderungen branchenexterner Absatzmärkte gerecht zu werden? Welche Absatzmärkte müssen regional mindestens vorhanden sein, damit die Absatzerlöse bei einer gegebenen Kostenstruktur einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen?

[175] Mit wachsender Entfernung der Absatzmärkte steigen auch die Transportkosten, was in ungünstigen Fällen letztlich die erhöhten Absatzerlöse aus der Generierung qualitativ besseren Outputs wiederum kompensieren kann.

Dazuhin ergibt sich auch aus dem Potenzial von Multimaterialrecyclingansätzen wie dem Status quo der Altmodulverwertung ein weiterer Forschungsbedarf. So kann der Output dieser Ansätze unter Umständen qualitativ auch in solch einem Maße gesteigert werden, dass ein hochwertiges Recycling nicht mehr notwendig ist, respektive im Extremfall nicht mehr konkurrenzfähig betrieben werden kann – oder umgekehrt: Vielleicht lassen sich hochwertige Recyclingansätze im Sinne der Verbundeffekte ohne große Einbußen bei der Qualität des Outputs unter ähnlichen Kostenstrukturen so variieren, dass ein hochwertiges und umfassendes Multimaterialrecycling ermöglich wird. Ein weiterer Ansatz ist hingegen die Senkung des generierbaren Outputs auf eine notwendige Mindestqualität, um im Gegenzug das (regional) verfügbare Volumen möglichen Prozessinputs auf ein potenzielles Maximum anwachsen zu lassen und so Qualität durch Quantität zu substituieren.

In toto zeigt sich folglich ein erheblicher Forschungsbedarf in der verfahrenstechnischen Auslegung unter Berücksichtigung ökonomischer Wechselwirkungen. Gleichwohl können neuere Erkenntnisse dann auch eine Neubewertung der Break-evens der aktivitätsspezifischen Nettogegenwartswerte notwendig machen, wobei der Fokus des weiteren Forschungsbedarfs auf der Verbesserung der finanzmathematischen Ausgangssituation einer Investition liegen sollte. Dies begreift auch die bereits im Kapitel 6.2 angedeuteten Zusammenhänge mit ein.

Zudem bietet die stete Optimierung der Produktionskosten die Möglichkeit, gezielt einen ökonomischen Anreiz zur Verwendung der gewonnenen Sekundärrohstoffe zu generieren. Hierfür müssten jedoch die Recyclingkosten in Summe soweit gesenkt werden können, dass die Bezugskosten der Sekundärrohstoffe aus Produzentensicht die der Primärrohstoffe unterschreiten. Dabei ist allerdings auch zu beachten, dass in der Produktion infolge der Nutzung der Outputfraktionen aus dem Recycling neben der potenziellen Senkung der reinen Rohstoffpreise ebenfalls die mengenmäßigen Gesamtbedarfe in Abhängigkeit der *kPM*s (Tabelle 4-26, Kapitel 4.5.6, Seite 285) entsprechend der Einbringungsstufe sinken. Dies kann den produktionskostengetriebenen Anreiz zusätzlich verstärken – sowohl argumentativ als auch raeliter.

6.3.2.3 Sonstige Aspekte

Der Vollständigkeit halber sei ein weiterer Ansatz erwähnt, welcher zwar gesellschaftlich heiß debattiert und aus verbraucherschutzrechtlicher Perspektive als verwerflich betrachtet, jedoch aus Produzentensicht mitunter als ökonomisch vorteilhaft bewertet wird: die geplante Obsoleszenz. Mit ausschließlichem Fokus auf potenzielle Recyclingaktivitäten und losgelöst der real angebrachten Bedenken samt aller negativen Folgen kann eine definierte Lebensdauer auch Chancen generieren und ökonomische Risiken senken, vor allem hinsichtlich der Planungssicherheit und der Prognose zukünftiger Altmodulströme. Geht diese definierte Lebensdauer von Produkten mit dem bereits beschriebenen Ansatz eines Bestands- oder Recyclingpotenzialkatasters (Kapitel 5.2.2.5) und der erweiterten Kennzeichnung nach Kapitel 6.3.1.2 einher, würde dies optimale Bedingungen für alle planerischen Aktivitäten rund um jene desiderate regionale Altmodulprognose, die Beschaffungslogistik und die langfristige Versorgungssicherheit effizieren. In der Konsequenz könnten so die spezifischen Kosten einzelner Recyclingaktivitäten als auch die gesamtsystemischen Kosten eines regionalen Verwertungsnetzes optimiert werden. Besonders die stark verbesserte Prognose regional auftretender Altmodulströme würde dem Kapitel 5.4.5.3 nach das finanzmathematische Entscheidungskriterium der Break-evens der Nettogegenwartswerte weiter zugunsten einer Investition verschieben.

Allerdings entspricht die geplante Obsoleszenz in diesem Zusammenhang theoretisch der Kenntnis der tatsächlichen Lebensdauer kristalliner Siliziumsolarmodule. Die im direkt voranstehenden Absatz beschriebenen Effekte und Auswirkungen können folglich auch über ein gezieltes Forschungsengagement und naturgemäß steigenden Erfahrungswerten aus dem realen Einsatz der Technologie erzielt werden.

6.3.3 Ökonomische Ebene

Basis der Diskussion der identifizierten Herausforderungen und des weiteren Forschungsbedarfs bezüglich der ökonomischen Ebene bilden zuvörderst die Erkenntnisse und Ausführungen der Kapitel 5.2 sowie 5.4 bis 5.6. Einen zentralen Aspekt stellen dabei die Break-evens der Nettogegenwartswerte einer Investition in eine Recyclingaktivität unter definierten Rahmenbedingungen dar, wobei die Höhe der Investitionssumme als eine der entscheidenden Restriktionen herausgearbeitet wurde. Laut dem Rat für nachhaltige Entwicklung ist jene Investitionssumme im Besonderen für das Recycling „[…] schwer zu benennen. Einig sind sich die Experten darin, dass er hoch ist.“ [Rat für nachhaltige Entwicklung 2011, S. 37] Abhilfe soll die Erhöhung der Investitionssicherheit infolge exakt formulierter Ziel- und Rahmenbedingungen schaffen. Allerdings können weitere Faktoren wie eine Preisvolatilität trotz klarer Rahmenbedingungen und nachgewiesener Wirtschaftlichkeit die notwendige Investition verhindern.

6.3.3.1 Nettogegenwartswert

Grundlegend wurden im Kapitel 5.4.6 die Break-evens der Nettogegenwartswerte einer potenziellen Investition in eine Recyclingaktivität unter definierten Rahmenbedingungen als zentrale ökonomische Hemmnisfaktoren identifiziert und benannt. Dies geht in letzter Konsequenz auf zu niedrige annuelle Gewinne in Folge eines zu geringen jährlichen Altmodulaufkommens zurück, da sich sonach der Nettogegenwartswert innerhalb eines adäquaten Zeitraums für eine realistische Investitionssumme negativ darstellt und infolgedessen aus finanzmathematischer Sicht die desiderate Initialinvestition verhindert. Neben den allgemeinen wirtschaftlichen Betrachtungen der Einflussfaktoren auf die Break-evens des Nettogegenwartswertes im Kapitel 5.4 ist ein weiteres Kriterium, welches einen Effekt auf eine Investitionsentscheidung unter definierten Rahmenbedingungen zeitigen kann, zu beachten: die Art der Finanzierung und die damit einhergehende Motivation. Es ist evident, dass eine reine Eigenkapitalfinanzierung andere Kalkulationszinsen einer Investitionsentscheidung zugrunde legt als eine Fremdkapitalfinanzierung. Der Einfluss auf die finanzmathematischen Restriktionen einer potenziellen zukünftigen Investition in eine Recyclingaktivität für kristalline Siliziumsolaraltmodule ist indes bisweilen nicht geklärt und markiert sonach eine technologiespezifische Forschungslücke.

Um die Investitionsargumente unabhängig der Finanzierungsart jedoch zu verbessern, sind die Break-evens der Nettogegenwartswerte nach Kapitel 5.4.5 positiv zu beeinflussen, indem die Wirtschaftlichkeit der potenziellen Recyclingaktivitäten beispielshalber durch die Senkung der Verfahrenskosten bei sonst gleichen Bedingungen optimiert wird. Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits dargelegt, ergeben sich mannigfaltige Optionen zur Kostenreduktion respektive Maßnahmen zur Verschiebung der Gewinnschwelle infolge der Anpassung entscheidender techno-ökonomischer Parameter. Allerdings existieren auch eine Vielzahl zumeist marktgetriebener und nicht selbstinduzierter Effekte, die sich unterschiedlich negativ oder positiv auf den KW auswirken. An dieser Stelle sei beispielshalber nochmals die Form des Recyclings herausgegriffen. Nach Kapitel 5.4.6 zeigt sich ein erheblicher Unterschied in der Investitionsempfehlung zwischen einem Recycling$_{VN}$ und einem Recycling$_{VR}$ in allen Planungsphasen. Eine detaillierte Begründung diesbezüglich ist dem Kapitel 5.4 direkt zu entnehmen. Im Allgemeinen unterliegt das Recycling$_{VN}$ jedoch zusätzlichen Risiken, die als weitere Hemmnisfaktoren identifiziert wurden. Den Ausführungen des Kapitels 5.5 nach sind dies vor allem die potenziellen Materialsubstitutionen sowie Verschiebungen der Marktanteile und der Einzug neuer Technologien in die Produktion. Daraus resultiert im Gros eine Anpassung des Moduldesigns und damit eine Beeinflussung des möglichen Absatzmarktes, was den bisherigen Erkenntnissen folgend verstärkt Auswirkungen auf ein Recycling$_{VN}$ hat und so erhebliche Hemmnisfaktoren speziell für diesen Ansatz effizieren kann.

Gleichwohl kann mit der Initiierung hochwertiger Recyclingaktivitäten ein (regionales) kapazitives Überangebot entstehen, was sich negativ auf die gesamte Recyclinginfrastruktur auszuwirken vermag (vgl Kapitel 5.4.3.2 und Kapitel 5.6). Die sich daraus ergebende kapazitätsgetriebene Konkurrenzsituation kann intratechnologische wie technologieübergreifende Ursprünge haben. So können beispielhalber Glasrecycler regionale Altmodulaufkommen abgreifen, welche sowohl für einen wirtschaftlichen Betrieb eines Recycling$_{VN/VR}$ kristalliner Siliziumsolaraltmodule als auch für die grundlegende Investitionsempfehlung essenziell sind. Dieses Missverhältnis lässt sich beispielshalber derzeit auf dem Markt der Siedlungsabfälle beobachten, wo existierende Verbrennungskapazitäten in Konkurrenz zu hochwertige Recyclingansätzen stehen. Daraus leitet sich folglich die Frage ab, inwieweit der derzeitige Status quo der Altmodulverwertung auch zukünftig regionale Altmodulströme abgreift und ob sich ein

hochwertiges Recycling auch mittels ökonomischer Argumente gegen jenes Downcycling durchsetzen kann. Diese marktorientierten Fragestellungen und die sich daraus ableitenden Forschungslücken sind Gegenstand des Kapitels 6.5. Daneben können aber auch intratechnologische Konflikte entstehen, die sich schlicht aus der marktgetriebenen Konkurrenzsituation ergeben. Solange nicht alle verfügbaren Altmodulströme abgegriffen sind oder Innovationen einen Wettbewerbsvorteil effizieren, welche die Markteintrittsbarriere für neue Teilnehmer sinken lässt, können okkasionelle und unvorhersehbare systemische Kapazitätsüberangebote entstehen. Dies führt letztlich wiederum zur Frage nach der Effizienz eines sich selbst überlassenen Marktes, sowohl hinsichtlich kurz- oder langfristiger Effekte als auch bezüglich des gesamten Systems oder auf akteursspezifischer Ebene.

Allgemein zeigt sich jedoch ob der derzeit fehlenden Grundlagenkenntnisse und Erfahrungswerte ein erhebliches Defizit, was marktorientierte Ansätze und Untersuchungen betrifft. Dazu zählen auch die bereits beschriebenen Unsicherheiten und Ungenauigkeiten bezüglich der zukünftigen Marktentwicklung. Dies begreift neben Preisrisiken aus nicht vorhersehbaren Schwankungen der Rohstoffpreise (Kapitel 5.4.2.1) auch die in dieser Arbeit häufig aufgegriffene imponderable Marktentwicklung der Technologienanteile (Kapitel 4.3 und 5.5), der zukünftigen Neuinstallationen (auch auf regionaler Ebene) nach Kapitel 4.2, der weiteren Verschiebung der Produktionskapazitäten in den asiatisch-pazifischen Raum (Kapitel 4.7) sowie den eben beschriebenen Markt verfügbarer Recyclingkapazitäten jedweder Art mit ein. Der weitere Forschungsbedarf umfasst entsprechend alle in diesem Absatz aufgeführten Punkte sowie eine ausführliche Beschreibung und Widerspiegelung der sich daraus ableitenden positiven und negativen Effekte respektive der Konsequenzen aus Externalitäten auf betriebswirtschaftlicher und volkswirtschaftlicher Ebene.

In toto reduziert sich jedoch auch der Hemmnisfaktor eines, für die derzeitigen Rahmenbedingungen, ungünstigen Nettogegenwartswertes auf die Problematik der fehlenden Volumina regional verfügbarer Altmodule.

6.3.3.2 Recyclingnetzwerk

Die nachstehenden Ausführungen basieren im Gros auf dem Inhalt des Kapitels 5.6, weshalb für eine detaillierte Diskussion der grundlegenden Zusammenhänge darauf verwiesen wird. Ein zentraler Aspekt ist der Konflikt zwischen betriebswirtschaftlicher und systemorientierter Optimierung, wobei der systemische Ansatz in eine planerische Aktivität im Voraus und eine Anpassung bereits bestehender Strukturen zu unterteilen ist. Deutlich wird dies in besonderer Weise bei der Thematik der Standortplanung. Bei einem selbst gewachsenem Netzwerk ist eine Standortoptimierung a posteriori ausgeschlossen. Solche systemischen Anpassungsmaßnahmen sind nur im Vorfeld mit einem langen Planungshorizont möglich, wobei es der Koordination und Planung mittels einer zentralen Verwaltung oder eines Dachverbandes bedarf. Grundlegend gilt es jedoch zuvörderst zu prüfen, inwieweit die Etablierung einer solchen zentralen Stelle und deren planerisches Wirken überhaupt möglich ist. Eventuell ist lediglich die Evolution eines potenziellen Recyclingnetzwerkes nachträglich steuer- oder positiv beeinflussbar. Für vertiefende Diskussionen der theoretischen Grundlagen zur Evolution von Verwertungsnetzen, etwaigen Existenzbedingungen und konzeptionellen Untersuchungen wird an dieser Stelle auf [Posch 2006], [Strebel und Schwarz 1998], [Sterr 2003] sowie [Möller 2006] verwiesen. Indessen ist speziell für den in dieser Arbeit ausführlich untersuchten Betrachtungsgegenstand und der gedanklichen Genese eines regionalen Verwertungsnetzes für kristalline Siliziumsolaraltmodule ein erheblicher Forschungsbedarf auszumachen. Dabei würde sich ein frühzeitiges Forschungsinteresse auf etwaige planerische und gestaltungstechnische Ansätze besonders günstig auswirken, weil diese selbst eine gewisse Vorlaufzeit benötigen. Sollte die Generierung und Planung eines regionalen Recyclingnetzwerkes potenziell möglich sein, kommt vornehmlich der optimalen Dimensionierung und Ausgestaltung des Netzwerkes ein gehobener Forschungsbedarf zu. Da die Dimensionierung solcher Netzwerke auch an die Prognosemodelle zukünftiger regionaler Altmodulaufkommen gebunden ist, sind ebenfalls die zugehörigen und in den Kapiteln 5.2.2.4, 5.4.4 sowie 6.2 bereits benannten Risiken mit in die Untersuchung einzubeziehen. Gleiches gilt für etwaige betriebswirtschaftliche Optimierungen, die Auslegung der aktivitätsspezifischen Recyclingkapazitäten oder die Standortplanung einzelner Netzwerkakteure. Zudem kommt der grundsätzlichen Ausgestaltung eines zumindest theoretisch optimalen Recyclingnetzwerkes für kristalline Siliziumsolaraltmodule ein weiteres Forschungspotenzial zu. Dies umfasst, wie im Kapitel 5.6.2

diskutiert, neben der Möglichkeit der sinnvollen Integrierung von Sortieranlagen, Zwischenlagern oder Zentrallagern auch die Senkung von Logistikkosten infolge der Konsolidierung der Transportleistung, die Auslegung des Fuhrparks oder Optimierungen im Sinne eines Collaborative Planning-Ansatzes. Ferner sind in diesem Zusammenhang Potenziale und Risiken zu beachten, welche mit dem im Kapitel 5.6.3 beschriebenen Konzept der Grid-Parity-Fabrik oder ähnlichen Konstrukten einhergehen.

Aber auch eine genaue Betrachtung der Resilienz bezüglich externer Effekte ist für regionale Recyclingnetzwerke, welche auf ein Minimum technologischer Ansätze spezialisiert sind, hochrelevant. In diesem Zusammenhang sollte insbesondere die Stabilität des Systems bei Marktumbrüchen oder Ausscheiden einzelner Netzwerkakteure im Fokus stehen. Neben dem betrachtungsrelevanten Fall des Recyclings kristalliner Siliziumsolaraltmodule ist die Störanfälligkeit bei imponderablen und abrupten Marktumbrüchen und deren Folgen (Kapitel 4.2, 4.3 und 5.5) in gleicher Weise auch für Multimaterialrecyclingnetzwerke von essenzieller Bedeutung. Diesbezüglich spielt die Frage, inwiefern sich die Widerstandsfähigkeit von einzelnen hochspezialisierten Netzwerkakteuren oder gar ganzen spezialisierten Netzwerken verglichen zu potenziellen Multimaterialrecyclingnetzwerken gegenüber den Effekten aus der zuvor oft beschriebenen und sehr wahrscheinlichen zukünftigen Verschiebung der Marktanteile einzelner technologischer Ansätze voneinander unterscheidet, eine zentrale Rolle. Wie stark wirkt sich in der Folge ein Ausscheiden einzelner Akteure auf die unterschiedlichen Strukturen aus? Gleichwohl sollten diese Aspekte und etwaige resultierende Effekte auch auf einer volkswirtschaftlichen Ebene untersucht werden. Zudem gilt es zu analysieren, inwieweit ein bestehendes regionales Recyclingnetzwerk eine Markteintrittsbarriere für neue Marktteilnehmer darstellt oder sich als möglicher Standortvorteil auswirken kann, um weitere oder innovative Akteure nachträglich anzusiedeln.

Abschließend ist auch die Rolle von PV Cycle diesbezüglich zu hinterfragen. Welche Aufgaben kann oder sollte ein Dachverband hier übernehmen? Welche Risiken, aber auch welche Chancen ergeben sich infolge solch einer zentralen Planung?

6.3.3.3 Sonstige Aspekte

Wenngleich kein Hemmnisfaktor sondern eher ein Potenzial sollte die Rücknahme als Instrument der Kundenbindung (zumindest Produzentenspezifisch) nicht minder im Forschungsinteresse stehen. Zumal der offensive Umgang mit einer Rücknahme von Photovoltaikmodulen im Allgemeinen als eine durchaus geeignete Antwort auf die Befürchtungen der mitunter ökologisch bedachten Konsumenten bezüglich etwaiger gefährlicher Inhaltsstoffe anzusehen ist. Darüber hinaus kann eine gezielte Rücknahme mittels eines Pfandsystems bereits diskutierte Risiken schmälern. Denkbar ist die Etablierung eines dynamischen Pfandsystems, welches nach der herstellerspezifischen Leistungsgarantie ansetzt. Ziel ist es, dem Nutzer einen ökonomischen Anreiz zu geben, damit er die Module innerhalb eines definierten Planungshorizontes austauscht. Dies kann beispielshalber so ausgestaltet sein, dass mit Auslaufen der Leistungsgarantie 15 % des ursprünglichen Kaufpreises erstattet werden; 5 Jahre danach noch 10 %; nach 10 Jahren 5 % und nach über 15 Jahren keine Erstattung erfolgt. Solch ein Ansatz kann dazu führen, obschon aus ökologischer Sicht, verbraucherrechtlichen Aspekten und im Sinne der Produktverantwortung nicht zulässig, dass sich die Rücklaufzeiten von Photovoltaikmodulen verkürzen und diese nicht bis zum tatsächlichen Lebensende genutzt werden. Rein auf die Auswirkung abstrahiert, wäre der Effekt für potenzielle Recyclingaktivitäten zu vergleichen mit dem im Kapitel 6.3.2.3 beschriebenen Instrument der geplanten Obsoleszenz (im idealtypischen Fall). Dies betrifft nicht nur die künstliche Verkürzung der Lebensdauer und damit die Erhöhung des Altmodulaufkommens, sondern auch die Verbesserung der Planungssicherheit und der Prognosemodelle zukünftiger Altmodulströme samt aller bereits diskutierten Konsequenzen.

Ein weiterer Aspekt ist die im Kapitel 4.7 beschriebene Verlagerung der Produktionskapazitäten kristalliner Siliziumsolarmodule in den asiatisch-pazifischen Raum. Dies wirkt sich insbesondere auf die ökonomische Leistungsfähigkeit potenzieller Recyclingaktivitäten in der kurz- und mittelfristigen Planungsphase aus, da die Produktionsausschüsse in dieser Periode den Hauptanteil am regional und national verfügbaren Altmodulaufkommen stellen. Wenngleich für die langfristige Planungsphase zwar das Altmodulaufkommen aus Produktionsausschüssen vernachlässigbar ist (vgl. Kapitel 5.2.2), kann sich die Absenz regionaler oder nationaler Produktionskapazitäten für kristalline Siliziumsolarmodule im Falle eines $\text{Recycling}_{\text{VN}}$ trotzdem als ökonomisches Risiko darstellen: mit der Verlagerung der Produktionskapazitäten schwindet

auch das desiderate regionale Absatzmarktvolumen. Maßnahmen zur Bindung oder (Wieder)-Ansiedlung regionaler Modulproduktionskapazitäten würden sich sonach sowohl inputseitig als auch outputseitig positiv auf die Wirtschaftlichkeit potenzieller Recyclingaktivitäten auswirken. Daher gilt es zu prüfen, welche Förderinstrumente zur (Wieder)-Ansiedlung oder zum Ausbau nationaler Produktionskapazitäten geeignet sind. Dabei sollten auch Aspekte Beachtung finden, die nicht auf einen rein monetären Anreiz reduziert werden können. Dies begreift neben den im Kapitel 5.6.3 aufgegriffenen Potenzialen beispielshalber auch etwaige resultierende Standortvorteile infolge technologisch potenter Cluster mit ein, die vor allem innovative Akteure ansprechen.

Wenngleich kein genereller Forschungsbedarf, sondern eher eine Anmerkung: Der Fokus der Forschungsbestrebungen bezüglich eines hochwertigen Recyclings sowohl unter technologischen als auch ökonomischen, sozialen und ökologischen Aspekten liegt derzeit auf dem Recycling von Dünnschichtmodulen. Laut [Cucchiella *et al.* 2015, S. 555] ist dies vor allem darauf zurückzuführen, dass: „[…] silicon-based panels (c-Si, p-Si and a-Si) are poor of valuable materials and their recycling cost is always higher than the landfilling one, making recycling an unfavorable economic option […]. From the opposite side, thin film panels (CIGS and CdTe) guarantee to recyclers a higher profit because of the content in valuable materials […].” – es handelt sich folglich um einen rein ökonomischen Anreiz. Aus Sicht des Autors der vorliegenden Arbeit sollte sich das Forschungsinteresse und -volumen indessen auch an den Marktanteilen der Technologien orientieren, nicht zuletzt aus ökologischen Gründen.

6.4 Regionaler Nutzen aus der Etablierung eines Recyclingnetzwerkes

Für die Diskussion eines potenziellen Nutzens, den ein regionales Recyclingnetzwerk hervorrufen kann, muss sowohl dessen erfolgreiche Etablierung als auch dessen ökonomische Leistungsfähigkeit als grundlegende Bedingung zur langfristigen Existenz der Strukturen auf System- und Akteursebene supponiert werden. Wenngleich ein intaktes Recyclingnetzwerk etwaige positive Effekte auf die Wettbewerbsfähigkeit der betrachteten Region direkt effizieren kann, ist auch eine indirekte Wirkung über die bereits ausführlich diskutierten Konsequenzen und Einsparpotenziale für einzelne brancheninterne und branchenexterne Unternehmen zu untersuchen. Branchenintern ist besonders für die fokussierte Region die mögliche Stärkung des ostdeutschen PV-Produktionsclusters (zumindest der restlichen Strukturen) ein zentraler Aspekt, wobei hier die Potenziale zur gezielten Wiederansiedlung infolge der Etablierung eines solchen regionalen Recyclingnetzwerkes zu diskutieren sind. Dies begreift vor allem die Reduktion der Versorgungs- und Entsorgungsunsicherheit der produzierenden Unternehmen ein. Branchenextern kommt hingegen der Generierung einer rohstoffspezifischen Senke ein hoher Stellenwert zu. Beide Mechanismen finden sich ob ihrer Bedeutung in den Unterkapiteln 6.4.1 und 6.4.2 separat diskutiert. Daneben sind aber auch branchenübergreifende regionale Emolumente denkbar, welche nun nachstehend behandelt werden.

Ein erster Aspekt diesbezüglich ist die Überschneidung mit der sächsischen Rohstoffstrategie. Laut [SMWA 2012, S. 29] soll Sachsen sich „[…] zu einem führenden Standort der Rückgewinnungswirtschaft in Deutschland und Europa […]“ entwickeln. Obzwar hierzu vorrangig generelle Maßnahmen wie eine grundlegende Abschätzung der Potenziale oder eine Anpassung des Kreislaufwirtschaftsrecht fokussiert werden, sind auch „[…] die Erhöhung der Attraktivität einer Rückgewinnung stofflich verwertbarer Abfälle im Inland anstelle eines Exports bzw. Förderung einer hochwertigen Rückgewinnung und der dafür erforderlichen Infrastruktur […]“ [SMWA 2012, S. 29] als Ziele eindeutig definiert. So wird einerseits die Etablierung potenzieller Recyclingaktivitäten nach den Leitlinien und Zielen der sächsischen Rohstoffpolitik unterstützt oder gefördert, andererseits kann die Etablierung auch solcher technologiespezifischen Strukturen einen Beitrag zur Erfüllung der Ziele leisten – es zeigt sich sonach ein wechselseitiger Nutzen, der sich

im Gros jedoch auf das Potenzial eines generierbaren Standortvorteils reduzieren lässt. Zum einen wird die Infrastruktur an die benötigten Rahmenbedingungen eines potenziellen Recyclingnetzwerkes angepasst, was letztlich branchenübergreifend positive Effekte generiert. Zum anderen können etablierte Recyclingnetzwerke die Attraktivität der Region für die Ansiedlung weiterer Strukturen erhöhen respektive unterstützend wirken. Dies führt in der Konsequenz dazu, dass ausgeprägte Recyclingstrukturen als zusätzliches Argument für die Attraktivität einer Region genutzt werden können[176] – Stichwort: Regionalmarketing. An dieser Stelle ist zwar die Vermarktung der Region als Ganzes aufzuführen, vielmehr steht aber die Vermarktung des regional-spezifischen wirtschaftlichen Angebots im Fokus. Regionalmarketing kann nach [Meyer 1999, S. 35] als marktorientiertes Steuerungskonzept zur regionalen Entwicklung angesehen werden. Mit Bezug auf die Leitlinien und Ziele der sächsischen Rohstoff-politik kann in Verbindung mit der Etablierung auch technologiespezifischer Recycling-strukturen ein regionales Charakteristikum entsprechend einer Key-Ressource-Strategie gezielt entwickelt werden; sofern zielführend. Für vertiefende Ausführungen zu den theoretischen Grundlagen mit Blick auf die gesellschaftliche und politische Ebene, realen Anwendungsbeispielen als auch Risiken, die ein Regionalmarketing hervorrufen kann, wird an dieser Stelle auf [Meyer 1999] verwiesen.

Neben dem Potenzial eines erweiterten und zielgerichteten Regionalmarketings kann die Etablierung funktionierender Recyclingstrukturen aber auch weitere Standortvorteile generieren. Laut [Wurpts 2009] sind infolge einer regionalen Kooperation Wettbewerbs-vorteile durch Kostensenkungen und Spezialisierungen möglich. So soll eine ent-sprechende regionale Verzahnung ein eigens induziertes wirtschaftliches Wachstum begünstigen, attraktive Investitionsbedingungen bieten und schließlich überregionale Anreize setzen können. Dies und die mögliche Implementation in ein potenzielles Regionalmarketing gilt es speziell für das Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule in weiterführenden und auf dieser Arbeit aufbauenden Forschungsinitiativen zu untersuchen: Welchen Beitrag kann eine regionale Etablierung der entsprechenden Strukturen diesbezüglich tatsächlich leisten?

[176] Gilt sowohl für brancheninterne als auch branchenexterne Produzenten.

Gleichwohl ist auch eine Stärkung der Wirtschaft aus den regionalen Bedingungen selbst heraus möglich. Nach [Sterr 2003, S. 285] führt die Etablierung regionaler Recyclingnetzwerke zu einem erhöhten regionalen Problemlösungsvermögen, sodass zur Schließung weiterer Stoffkreisläufe vorrangig regional ansässige Unternehmen eingesetzt werden. Ein weiterer und vor allem langfristig positiver Effekt ist die Generierung eines regionalen Marktes hochqualifizierter Arbeitskräfte. Hier steht speziell die strategische Zusammenarbeit von Unternehmen, Universitäten und Ausbildungsstätten, welche in der Region des Recyclingnetzwerkes existieren, im Mittelpunkt. Diesem Aspekt kommt ein hoher Stellenwert hinsichtlich der Wechselwirkung des regionalen Nutzens aus der Etablierung der Recyclingstrukturen und dem Nutzen der Recyclingstandorte und anderer Unternehmen aus der regionalen Entwicklung zu, da er eine zukunftsorientierte Wirkung hat und nachhaltige Wettbewerbsvorteile effiziert [Wurpts 2009]; [Sterr 2003, S. 349]. Darüber hinaus spricht [Sterr 2003, S. 349] auch von der Möglichkeit vielschichtiger regionaler „Trickle-down-Effekte“. Wenngleich die zugehörige Theorie in Fachkreisen stark umstritten ist, sind zumindest bezogen auf die möglicherweise resultierende regionale Konzentration von Fachkräften einzelne effektbezogene Auswirkungen durchaus nachvollziehbar.

Grundlegende Voraussetzung jedweder planerischen Aktivitäten zur Etablierung eines potenziellen Recyclingnetzwerkes ist jedoch die Identifikation möglicher regionaler Absatzmärkte und Bezugsquellen. Auch hier gilt es im Zuge des Voranschreitens der verfahrenstechnischen Möglichkeiten weitere Forschungsergebnisse zu generieren.

Nach [Schwarz 1998, S. 23] können aus der regionalen Etablierung von Recyclingnetzwerken weitere Vorteile resultieren. Zum einen sinken aufgrund des verstärkten zwischenbetrieblichen Informationsaustausches die Transaktionskosten beim Aufbau neuer Recyclingbeziehungen. Zum anderen steigt die regional verfügbare Informationsqualität und -quantität hinsichtlich adäquater Altmodulströme, vorhandener Recyclingtechnologien und möglicher Potenziale. Dies wirkt sich wiederum direkt auf die regionalen Rahmenbedingungen produzierender Unternehmen ob der Reduktion der Versorgungs- und Entsorgungsunsicherheiten aus – in besonderer Weise jedoch branchenintern mit Fokus auf das ostdeutsche PV-Produktionscluster.

6.4.1 Stärkung des ostdeutschen PV-Produktionsclusters

Das ostdeutsche PV-Produktionscluster, oder zumindest die übrig gebliebenen regionalen Strukturen, ist hinsichtlich der Fertigung kristalliner Siliziumsolarmodule nicht mehr als globales Spitzencluster anzusehen; die mittlerweile nahezu bedeutungslose Stellung zeigt sich besonders flagrant im internationalen Vergleich. Der gegenwärtige Zustand, wie im Kapitel 4.7 diskutiert, ist geprägt von Negativentwicklungen ob Schließungen einzelner Produktionsstandorte, Insolvenzen, Kapazitätsabbau und Produktionsverlagerungen. In diesem Zusammenhang stellen sich folgende Fragen: Kann die regionale Etablierung eines wettbewerbsfähigen Recyclingnetzwerkes diese Entwicklung beeinflussen? Sollte dies der Fall sein, sind die Treiber dafür zu identifizieren und dahingehend zu überprüfen, welchen Beitrag solche Strukturen faktisch leisten können. Ist so unter Umständen sogar eine Umkehrung des Negativtrends möglich?

Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf dem Recycling kristalliner Siliziumsolar-altmodule liegt, ergibt sich mit dem Betrachtungsgegenstand dieses Kapitels ein klarer brancheninterner Bezug – es wird folglich ein Recycling zur Wiederverwendung oder Wiederverwertung vorausgesetzt. Wenngleich sonach die Reduktion der Versorgungs- und Entsorgungsunsicherheiten der Produzenten den zentralen Vorteil stellen, sollen zunächst weitere potenzielle Wechselwirkungen betrachtet werden. Hierzu zählen beispielshalber wiederum die Senkung von Transaktionskosten infolge des verbesserten Informationsflusses bei langfristigen Beziehungen. Dies zielt auf Kosteneinsparungen resultierend aus einem kollektiven Erfahrungsschatz ab. Infolgedessen sollen laut [Schwarz 1998, S. 18] der Umgang mit Behörden oder sonstigen Anspruchsgruppen ausgetauscht und so etwaige Genehmigungsverfahren akzeleriert werden können. Der verbesserte Informationsfluss kann aber auch zur leichteren Problemlösung zwischen vertrauten Partnern führen. Besonders bei langfristigen Geschäftsbeziehungen können gepflegte Kommunikationsschnittstellen innovationsfördernd wirken und die dafür notwendige Akzeptanz steigern. [Schwarz 1998, S. 18f] schreibt auch der potenziellen unternehmensübergreifenden Nutzung spezieller Fachkräfte einen positiven Effekt zu. An dieser Stelle ist natürlich auch die Nutzung des aus der Kooperation der regional ansässigen Unternehmen, Universitäten und Ausbildungsstätten möglicherweise resultierenden Marktes hochqualifizierter Arbeitskräfte wiederum aufzuführen. Ein weiterer Aspekt geht darauf zurück, dass schon allein die Existenz geeigneter regionaler Recyclingstrukturen die Bereitschaft, Potenziale aus einem Recycling in die planerischen

Aktivitäten einzubeziehen, erhöhen kann. Ein anderer Aspekt ist die Möglichkeit der Abstimmung der einzelnen Managementsysteme oder die Nutzung einer technisch-organisatorischen Beziehung. Hier sollte besonders ein Dachverband wie PV Cycle zentrale Aufgaben übernehmen. Diese beinhalten beispielsweise die Verwaltung bedeutender recyclingrelevanter Informationen und die Identifikation von weiteren potenziellen Netzwerkpartnern. [Schwarz 1998, S. 22]

Werden diese Potenziale ausgeschöpft, kann dies ein Argument für die Wiederansiedlung neuer Produzenten oder den Verbleib bestehender Strukturen infolge eines etablierten Recyclingnetzwerkes darstellen. Wie bereits erwähnt, kommt diesbezüglich besonders dem erleichterten Zugang zum möglicherweise resultierenden regionalen Markt hoch-qualifizierter Arbeitskräfte eine gewichtiges Nutzenpotenzial zu.

Der substanzielle Treiber für die Stärkung des Produktionsclusters aus der Etablierung eines regionalen Recyclingnetzwerkes ist jedoch im monetären Anreiz zu finden. Dieser ergibt sich aus dem Standortvorteil einer regionalen Verzahnung von Produktion und Recycling: der bereits des Öfteren angeführten Reduktion der Versorgungs- und Entsorgungsunsicherheiten. Im Falle der brancheninternen Vernetzung gilt dies gleich-bedeutend für Produzenten und Recycler – es bietet sich ein gegenseitiger Nutzen dar. Etwaige Produzenten können bei bestehenden Beziehungen sonach davon profitieren, dass der standortspezifische Ausschuss aufwandsminimal und rechtskonform abgegeben werden kann. Gleichwohl kann bei einem hochwertigen Recyclingansatz die Abhängig-keit der Produzenten vom volatilen Primärrohstoffpreis (begreift auch die Senkung etwaiger Importabhängigkeiten mit ein) wesentlich reduziert werden. Zudem können sich, in Anlehnung an die Tabelle 5-15 auf Seite 506 und die Diskussion des zugrunde liegenden Kapitels 5.3.9, Einsparpotenziale in der Produktion neuer $gSSM_{sc/mc}$ ergeben, was Energie- und Stoffströme einbegreift. Diese können, je nachdem ob ein $Recycling_{VN}$ oder $Recycling_{VR}$ betrieben wird, unterschiedliche Ausprägungen annehmen; in jedem Fall jedoch einen Kostenvorteil im Vergleich zur reinen Neuproduktion effizieren. Wie erwähnt, gilt dies analog aus Sicht einer Recyclingaktivität, besonders was die Verlässlichkeit eines regional verfügbaren Absatzmarktes für die Sekundärrohstoffe betrifft. Allerdings kann eine regionale Vernetzung von Produktion und Recycling auch Abhängigkeiten effizieren, die unternehmerische Risiken für beide Seiten zeitigen. Welche Auswirkungen hat hier beispielhalber ein Ausscheiden einzelner Akteure aus dem Netzwerk? Es ist sonach ein durchaus breiter Forschungsbedarf bezüglich der

brancheninternen Effekte, Potenziale und Risiken zu identifizieren. Allerdings sollten gleichwohl branchenexterne Zusammenhänge und die Rückkopplung auf einen etwaigen regionalen Nutzen weiter in den Mittelpunkt etwaiger Forschungsaktivitäten rücken. Branchenübergreifen kommt jedoch vor allem der Versorgung der regional ansässigen Produzenten mit Sekundärrohstoffen ein hohes Nutzenpotenzial zu. Bei einer von der Zielbranche losgelösten Betrachtung rückt so automatisch die Erhöhung der wirtschaftlichen Attraktivität der Region infolge der künstlichen Erzeugung einer Rohstoffsenke in den Fokus.

6.4.2 Schaffung einer Rohstoffsenke durch gezielten Altmodulimport

Mit dem regionalen Anlagenbestand kristalliner Siliziumsolarmodule sind auch die darin gebundenen Materialien örtlich fixiert. Durch eine multiplikative Verknüpfung der Modulanzahl mit den in Tabelle 4-28 (Kapitel 4.5.6.1, Seite 290) definierten Quantitäten aller Ingredienzien lässt sich der Modulistbestand in Rohstoff- oder Materialäquivalente umrechnen. Diese Äquivalente kommen faktisch dem regional verfügbaren Sekundärrohstoffpotenzial aus installierten Siliziumsolarmodulen gleich. In Tabelle 5-9 des Kapitels 5.3 auf Seite 458 wurde dieses Potenzial zudem mit der entsprechenden Altmodulprognose verschnitten, sodass sich, unter Annahme eines vollkommen stofflichen Recyclings höchster Güte und perfekter Sortenreinheit, das prognostizierte gebietsbezogene Altmodulaufkommen als annuelle Stoffströme der einzelnen Ingredienzien darbietet. Nach Kapitel 5.3 ist ein verlustfreies Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule allerdings aus verfahrenstechnischer Sicht (derzeit) nicht möglich. Deshalb sind die potenziell verfügbaren Sekundärrohstoffströme in Abhängigkeit vom zugrunde liegenden Recyclingverfahren anzupassen. Hierfür ist die multiplikativ verknüpfte regionale Altmodulprognose mit der Quantität aller Ingredienzien nach Tabelle 4-28 auf die real generierbaren Outputfraktionen spezifischer Recyclingverfahren zu reduzieren. Den bisherigen Ausführungen folgend ist dabei eine Unterscheidung in ein $\text{Recycling}_{\text{VN}}$ und ein $\text{Recycling}_{\text{VR}}$ von essenzieller Bedeutung, da beide Ansätze verschiedene Outputfraktionen unter abweichenden Verlustraten generieren. Datengrundlage zur Berechnung jährlich regional verfügbarer Sekundärrohstoffe aus dem Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule in Abhängigkeit der eingesetzten verfahrenstechnischen Lösung sind sonach die für die betrachtungsrelevante Region zugeschnittene Altmodulprognose sowie

die Tabelle 5-16 und Tabelle 5-17 aus dem Kapitel 5.4.2.1 auf den Seiten 517 und 520. Auf Basis der Altmodulprognosen des Kapitels 5.2.2.4 finden sich im Anhang 6-1 bis 6-3 beispielhafte Kalkulationen für die Regionen Sachsen samt deutschseitiger Anrainer inklusive Berlin, das ostdeutsche PV-Produktionscluster sowie die Region Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen. Die farbliche Codierung orientiert sich dabei an der im Kapitel 5.2.2.4 gewählten. Der angeführte Zeitraum zwischen 2020 und 2050 stellt dabei keine systembedingte Restriktion dar; er lässt sich beliebig definieren und wurde aus Gründen der Darstellbarkeit adäquat gewählt. Zudem wurden die annuellen Sekundärrohstoffpotenziale aufsummiert. Diese materialspezifische und vom jeweiligen Recyclingverfahren abhängige Gesamtmenge drückt sonach aus, welche Summen in der betreffenden Region innerhalb von 30 Jahren kumuliert zu erwarten sind.[177] Für die Region des ostdeutschen PV-Produktionsclusters könnten bei einem bis 2020 etablierten Netzwerk für das Recycling zur Verwendung bis 2050 entsprechend dem Anhang 6-2 mehr als 12,3 Millionen Modulfrontglasscheiben, über 646 Millionen kristalline Siliziumrohwafer bei zuzüglich knapp 1.300 t SGS_p, 1.787 t Kupfer sowie 33.164 t Aluminiumlegierung in Form von Modulrahmungen zurückgewonnen und dem regionalen Markt zugeführt werden. Aufgrund des $Recycling_{VN}$ würde dies ob der passgenauen Spezifikationen der Sekundärrohstoffe insbesondere den brancheninternen Markt betreffen. Im Falle eines RecyclingVR würden über die Zeitspanne dieser 30 Jahre so rund 174.308 t Glasbruch, 7.633 t SGS_p, 1.787 t Kupfer, 33.548 t Aluminium, 75 t Silber und 7 t als Summe aus Blei und Bismut regional verfügbar werden.[178] Annuelle Werte sind der Tabelle im Anhang 6-2 direkt zu entnehmen.

Um allerdings das Potenzial dahinter greifbarer zu machen, soll nachstehend das Jahr 2045 exemplarisch herausgegriffen werden. Wie im Kapitel 4.7 dargelegt, ist das Gros der in Deutschland ansässigen Produzenten von $gSSM_{sc/mc}$ ob der fehlenden nationalen Produktionskapazitäten auf einen Import von Zellen oder Wafern angewiesen. Nach Anhang 6-2 würden infolge eines $Recycling_{VN}$ der vor Ort anfallenden Altmodule alleinig im Jahr 2045 knapp 43,5 Millionen kristalline Siliziumsolarrohwafer anfallen. Nach Kapitel 4.5.6 werden inklusive der produktionsbedingten Verluste rund 65,775 Wafer

[177] Über eine Multiplikation der einzelnen Fraktionen mit einem durchschnittlichen Sekundärrohstoffpreis könnte darüber hinaus folglich dem Gesamtaufkommen ein regionalspezifischer monetärer Wert zugeordnet werden.

[178] Ob der imponderablen Entwicklung und den im Kapitel 5.5 beschriebenen potenziellen technologiespezifischen Materialsubstitutionen, ergo aufgrund etwaiger stofflicher Divergenzen zwischen zukünftigen Modulkonzeptionen und dem definierten $gSSM_{sc/mc}$, können sich jedoch auch erhebliche Abweichung zwischen den prognostizierten materialspezifischen und real auftretenden Mengenströmen ergeben.

je neuproduzierten $gSSM_{sc/mc}$ benötigt – aus dem $Recycling_{VN}$ der im ostdeutschen PV-Produktionscluster im Jahr 2045 anfallenden $gSSM_{alt}$ würden regional genügend kristalline Siliziumsolarrohwafer verfügbar sein, um auf deren Basis rund 660.000 kristalline Siliziumsolarmodule zu fertigen. Dies entspricht einer jährlichen Produktionskapazität von knapp 160 MW_p. Darüber hinaus würden rund 830.000 Glasscheiben einer für die Produktion kristalliner Siliziumsolarmodule adäquaten Spezifikation (inklusive Verlustraten) potenziell disponibel sein. Für branchenexterne Zwecke könnten infolge eines $Recycling_{VR}$ für das betreffende Jahr demnach circa 513 t SGS_p, ~ 120 t Kupfer, 2.256 t Aluminium, über 5 t Silber sowie gemeinsam 0,44 t Blei und Bismut zugänglich gemacht werden.

Die regional ansässige Wirtschaft kann daraus auf verschiedene Weise auch branchenübergreifend profitieren. Zum einen können infolge des regionalen Bezugs die Auswirkungen stark volatiler Weltmarktpreise für bestimmte Primärrohstoffe abgefedert und zum anderen die Resilienz vor allem bezüglich temporärer Engpässe gestärkt werden. Gleichwohl können beispielshalber langfristige Beziehungen helfen, etwaige Importabhängigkeiten zu senken. Für die Beeinflussung der Vulnerabilität gegen strukturelle Engpässe sind die Mengen zwar zu niedrig, laut Kapitel 4.6.2 sind diese jedoch ohnehin nicht zu erwarten; zumindest was die potenziellen Outputfraktionen aus einem Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule betrifft (ausgenommen Bismut, welches allerdings nur in sehr geringen Mengen für die Produktion eines $gSSM_{sc/mc}$ benötigt wird). Allerdings kann die Altmodulmenge und damit die potenziell regional generierbare Sekundärrohstoffmenge infolge eines gezielten Altmodulimports künstlich erhöht werden. Hierfür sind jedoch auch die benötigte Infrastruktur anzupassen und die Kapazitäten durch die einzelnen Akteure vorzuhalten; das Recyclingnetzwerk ist entsprechend zu dimensionieren. Im Einklang mit den Zielen der sächsischen Rohstoffstrategie kann so eine rohstoffspezifische Senke generiert werden. Die resultierenden brancheninternen Potenziale stellen sich als mannigfaltig dar. Gleichwohl sind die branchenexternen Vorteile für regional ansässige Produzenten primär in der Reduktion der Versorgungsunsicherheit zu finden. Zuvörderst sind dafür indessen die rechtlichen Grundlagen eines internationalen Altmodulimports abzuklären. Sowohl die rechtlichen Grundlagen als auch die möglichen Effekte aus einem Modulimport sowie die reale Umsetzbarkeit einer künstlich induzierten Rohstoffsenke sind bislang nicht geklärt und signalisieren diesbezüglich einen erheblichen Forschungsbedarf.

Zudem kommt aber auch zukünftigen Entscheidungen des Dachverbandes PV Cycle essentieller Charakter zu, wobei eine Unterstützung respektive Befürwortung der Etablierung eines Recyclingnetzwerkes in der betrachteten Region einen überaus positiven Effekt für die strukturelle Entwicklung des Netzwerkeses selbst als auch für die Region und das ostdeutsche PV Produktionscluster zeitigen würde.

6.5 Volkswirtschaftliche Aspekte

Den volkswirtschaftlichen Aspekten kommt ein eigenes Kapitel auf zweiter Ebene zu, da diese bislang in der vorliegenden Arbeit nur untergeordnet Beachtung fanden. Dies liegt jedoch primär daran, dass die bereits beschriebenen Forschungslücken sich auch auf das Grundlagenwissen erstrecken. Dieses galt es vordergründig zu untersuchen, um darauf aufbauend überhaupt volkswirtschaftliche Effekte in den Fokus stellen zu können; ohne die Kenntnis der grundlegenden Gegebenheiten und Zusammenhänge ist eine adäquate Untersuchung auf volkswirtschaftlicher Ebene schlicht nicht möglich. Basierend auf den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit ändert sich dieser Sachverhalt indessen, weshalb nachstehende Ansätze einen weiteren Forschungsbedarf benennen, dem nunmehr eine entsprechende Datengrundlage zukommt. Weiter sind etwaige Betrachtungen und Diskussionen bisweilen nur auf theoretischer Ebene möglich, da, wie bereits dargelegt, derzeit real keine adäquaten Recyclingstrukturen existieren. Zudem wurden die notwendigen Anpassungsmaßnahmen und die desideraten betriebswirtschaftlichen Voraussetzungen zur potenziellen Etablierung leistungsfähiger Strukturen ebenfalls bereits analysiert, weshalb die Diskussion auf fortführende Fragestellungen reduziert wird. Dies bezieht sich weitestgehend auf die Betrachtung langfristiger Perspektiven möglicher etablierter Recyclingstrukturen und den Einsatz etwaiger marktorientierter oder ordnungsrechtlicher Instrumente sowie deren Auswirkungen, Potenziale und Risiken. Sonach ergeben sich beispielhaft folgende zentrale Fragestellungen: Können etablierte Recyclingstrukturen im gegebenen Umfeld langfristig Bestand haben? Kann Recycling in diesem Zusammenhang neben dem zuvor beschriebenen Nutzen für die Region auch einen Beitrag zu einer nachhaltigen regionalen Entwicklung leisten?

Recycling ist dann nachhaltig, wenn die gesamtwirtschaftlichen Kosten einer Sekundärrohstoffverwertung die unverzerrten vollständigen Kosten einer Durchflussökonomie unterschreiten. Betriebswirtschaftlich wird ein Recycling aber selbst unter dieser Voraussetzung nur dann auf Rohstoffmärkten einer Durchflusswirtschaft vorgezogen, wenn es für die Marktakteure profitabler ist.

Vor diesem Hintergrund sind in der Konsequenz wiederum zahlreiche wirtschaftlich Fragen zu adressieren: Welche Vorteile bringt ein Recycling in der PV-Industrie generell mit sich? Sind die Kosten eines Recyclingansatzes gesamtgesellschaftlich kleiner als die einer Durchflusswirtschaft? Dies zielt besonders auf die Kosten der langfristigen Rohstoffversorgung und Abfallhandhabung ab. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist sonach die Gesamtlösung vorzuziehen, die die gesellschaftlich minimalen Kosten verursacht. Weiter stellt sich die Frage, welche Kompetenzen auf Länderebene liegen und welche Optionen Sachsen hätte, eine mögliche Recyclingindustrie zu unterstützen, und ob dies ökonomisch rational sein könnte. Vordergründig ist natürlich eine Region mit einem möglichst hohen Selbstanteil an anfallenden Altmodulen im Aufbau einer PV-Recyclingindustrie gegenüber anderen Regionen im Vorteil. Dies kann aber durch geeignete Instrumente für einen erleichterten Modulimport beeinflusst werden. Zusätzlich ist zu diskutieren, ob ein eventuell resultierender Sekundärrohstoffmarkt sich selbst überlassen bleiben kann oder ob ein Marktversagen vorliegt und der Einsatz von ordnungsrechtlichen oder marktorientierten Instrumenten auf regionaler Ebene notwendig wird, um einen volkswirtschaftlichen Mehrwert von Recycling regional abzusichern. Letztendlich, sollten sich funktionierende Recyclingstrukturen langfristig durchsetzen, kann der generierbare Mehrwert für die betrachtete Region auch auf volkswirtschaftlicher Ebene vertiefend untersucht und teilweise verifiziert werden. Dabei müssten dann ebenfalls potenzielle branchenübergreifende Effekte Beachtung finden. Zentraler Aspekt des identifizierten Forschungsbedarfs ist dieserhalb zuvörderst die Implementierung der erzielten Ergebnisse in einen volkswirtschaftlich-theoretischen Rahmen.

Neben diesem allgemeinen Forschungsbedarf sind indessen aber auch spezifische Fragestellungen zu einzelnen Instrumenten zwingend zu beantworten. Diese umfassen nicht nur den bereits erwähnten marktorientierten oder ordnungsrechtlichen Maßnahmenkatalog, sondern auch territoriale, ökologische und übergreifende Aspekte. So können vor allem bei überregionalen Recyclingnetzwerken Prozesse und Entscheidungen entgegen des nationalen Wettbewerbsföderalismus positive Effekte zeitigen [Wurpts 2009].

Gleichwohl sollte auch eine Untersuchung der hemmenden sowie unterstützenden Prozesse zur Ausbildung regionaler Recyclingnetzwerke auf theoretischer Ebene weiter fokussiert werden. Dies begreift insbesondere Erklärungsansätze der Neuen Institutionenökonomie wie die Transaktionskosten-, die Property-Rights-, die Principal-Agent- und die Ressource-Dependence-Theorie als Diskussionsbasis mit ein, wobei diese nicht vollends getrennt voneinander anzuwenden sind. So kann beispielshalber laut [Posch 2006, S. 138] die Transaktionskostentheorie den Gesamtaufbau oder die notwendigen Managementstrukturen unternehmensübergreifender Planungsvorgänge nicht erklären. Für eine einführende Betrachtung der vier genannten theoretischen Ansätze mit Bezug auf potenzielle Recyclingnetzwerke wird an dieser Stelle auf [Posch 2006, S. 121ff] verwiesen, für den Bezug zur Umweltökonomie auf [Haas und Schlesinger 2007, S. 17ff] (beinhaltet auf den Seiten 29ff auch eine Diskussion umweltpolitischer sowie nicht fiskalischer Instrumente) und für eine allgemeine Einführung auf [Mankiw 2004]. [Farmer 1998, S. 165ff] betrachtet zudem volkswirtschaftlich-ordnungsökonomische Aspekte für zwischenbetriebliche Verwertungsbeziehungen sowie Effekte eines wirtschaftsrechtlichen Dirigismus.

Weiter gilt es gezielt zu untersuchen, ob zukünftig ökonomische oder marktorientierte Maßnahmen notwendig werden können, um ein hochwertiges Recycling ökonomisch mindestens auf eine Stufe mit dem Status quo (Downcycling) des Recyclings kristalliner Siliziumsolaraltmodule zu stellen oder gar um einen gezielten Anreiz zur Etablierung hochwertiger Recyclinglösungen zu geben. Wie bereits erwähnt, geht der Aufbau von Recyclinganlagen mit wirtschaftlich Risiken einher. Laut [Kuehnle 2014] existiert zum einen eine große Unsicherheiten in der Planung der Auslastung. Zum anderen stehen die Anlagen in preislicher Konkurrenz (auch) zu herkömmlichen Recyclingunternehmen. Zudem wirkt hier selbst der bereits im Kapitel 5.3.1 angeführte Aspekt, dass Deponierungskosten der Reststoffe aus dem Status quo des Recyclings kristalliner Siliziumsolaraltmodule niedriger liegen als die Verfahrenskosten eines $\text{Recycling}_{\text{VN/VR}}$, der Etablierung ökologisch hochwertiger Recyclingstrukturen gegenüber hemmend. Neben der Konkurrenzsituation zu branchenexternen Recyclingansätzen (Status quo des Recyclings kristalliner Siliziumsolaraltmodule) und Verbrennungsanlagen sind auch die Wechselwirkungen mit möglichen brancheninterne Überkapazitäten nach Kapitel 6.3.3.1 in den Fokus zu rücken. In toto resultiert hieraus abermals ein weiterführender Forschungsbedarf, welcher insbesondere die folgenden Fragestellungen adressieren

sollte: Welche marktgetriebenen Risiken ergeben sich für bestehende Recyclingnetzwerke sowohl kurzfristig als auch langfristig oder ist möglicherweise auch ein branchenübergreifender Einfluss zu erwarten? Sind eventuell sogar innovationsfördernde Effekte denkbar, die langfristige Wettbewerbsvorteile für das gesamte technologiespezifische Recyclingnetzwerk hervorrufen können?[179] Und letztlich als zentraler Punkt: wie stabil (kurzfristig und langfristig) ist ein sich potenziell ergebender regionaler Markt; kann er sich selbst regulieren oder wird hier der Einsatz ordnungsrechtlicher und marktorientierter Instrumente notwendig?

Zudem würde der Einsatz etwaiger Instrumente oder Maßnahmen, die der Etablierung regionaler Recyclingstrukturen und der Kreislaufschließung respektive der Rezyklierung potenzieller Sekundärrohstoffe dienen, neben dem nach Kapitel 6.4 eventuell resultierenden regionalen Nutzen auch den langfristigen Zielen des Deutschen Ressourceneffizienzprogrammes (ProgRess) gerecht werden. Laut [BMU 2012] ist eine der Leitideen des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess) die sukzessive Entkopplung der Wirtschafts- und Produktionsweisen in Deutschland von der Verwendung von Primärrohstoffen sowie die Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft und deren aktive Förderung.

Neben der Reduzierung der Verfahrenskosten als selbstinduzierte Maßnahme zur Erhöhung der Chance einer tatsächlichen Integrierung hochwertiger Recyclingstrukturen in regionale Stoffkreisläufe ist beispielshalber ein denkbarer anreizgetriebener Ansatz die Nutzung von Abnahmepreisen seitens der Recycler. Das ist jedoch überhaupt nur unter der Prämisse möglich, als dass es die wirtschaftlichen Gegebenheiten einer potenziellen Recyclingaktivität zulassen. Dies kann dann allerdings den Effekt zeitigen, dass die Produzenten oder Vertreiber im Sinne der Rücknahmepflicht nach §16 Absatz 1 ElektroG2 (Hersteller) und §17 Absatz 1 und 2 ElektroG2 (Vertreiber) in Verbindung mit der Behandlungs- und Verwertungspflicht nach § 20 Absatz 1 und 2 sowie § 22 Absatz 1 ElektroG2 aus rein ökonomischer Triebkraft eine hochwertige Recyclinglösung dem Downcycling vorziehen. Der gegenteilige Ansatz resultiert aus einer gezielte Kostenübernahme oder einer Beteiligung an den Recyclingkosten seitens der Hersteller. Dies kann als eine ökonomische Maßnahme zur Stärkung und generell zur Ansiedlung

[179] Unter Umständen kann das Netzwerk von selbst heraus Innovationen generieren und als Innovationsnetzwerk in Erscheinung treten. Allerdings können langfristige Netzwerkbeziehungen nicht nur Innovationen begünstigen, sie können sie auch verhindern. Grund hierfür sind laut [Posch 2006, S. 191] kostenintensiv aufeinander abgestimmte Recyclingbeziehungen oder langfristige vertragliche Bindungen.

hochwertiger Recyclingaktivitäten angesehen werden, zumal die Hersteller oder deren Bevollmächtigte nach § 7 Abs. 1 und 2 ElektroG2 ohnehin eine Finanzierungsgarantie zu leisten haben. Hierdurch kann die nach § 20 Absatz 1 Satz 2 und 3 ElektroG2 meist restriktiv ausgelegte wirtschaftliche Zumutbarkeit sichergestellt und so ein hochwertiges Recycling auch weiter begünstigt werden. Diese exemplarisch aufgeführten Maßnahmen sind in letzter Konsequenz nicht nur auf ihre möglichen Risiken und Chancen, die sie hervorrufen können, sondern vor allem hinsichtlich der resultierenden Wirkmechanismen sowie auf ihre Effizienz hin zu prüfen.

Ein weiterer Aspekt ist die Untersuchung der Resilienz solcher technologiespezifischen regionalen Recyclingnetzwerke gegen externe Einflüsse wie beispielshalber einen Marktumbruch oder das Ausscheiden einzelner Netzwerkakteure. Dies zielt im betrachtungsrelevanten Fall des Recyclings kristalliner Siliziumsolaraltmodule oder im Falle eines Multimaterialrecyclingnetzwerkes insbesondere auf imponderable und abrupte Marktumbrüche und deren Folgen ab (Kapitel 4.2, 4.3 und 5.5). Daraus resultieren Fragen, wie: Welche Auswirkungen hat die bereits des Öfteren diskutierte und hochwahrscheinliche Verschiebung der technologiespezifischen Marktanteile sowohl im Falle spezialisierter Netzwerkakteure oder eines spezialisierten Netzwerkes im Vergleich zu einem Multimaterialrecyclingnetzwerk? Wie wirkt sich besagtes Ausscheiden einzelner Akteure auf die unterschiedlichen Strukturen aus? Diese bereits aus netzwerkanalytischer Sicht adressierten Fragen und etwaige darauf basierende Effekte sind gleichwohl auf volkswirtschaftlicher Ebene zu untersuchen. Ein essenzieller Faktor für eine erhöhte Resilienz spezialisierter Recyclingstrukturen und der darauf basierenden positiven Auswirkung auf die langfristige Systemstabilität ist allerdings die Existenz regionaler Redundanzen sowohl den potenziellen Absatzmarkt als auch die desideraten Quellen für den Altmodulinput betreffend. Es ist daher evident, dass sich Recyclingnetzwerke vornehmlich in Regionen etablieren und langfristig Bestand haben können, in denen eine hohe Redundanz den Markt auch gegen kurzfristige externe Effekte stabilisieren kann und so einen regionalen Standortvorteil generiert. Zudem gilt es auch in diesem Zusammenhang zu analysieren, inwieweit ein bestehendes regionales Recyclingnetzwerk eine Markteintrittsbarriere für neue Marktteilnehmer darstellt oder sich als möglicher Standortvorteil auswirken kann, um neue oder gar innovative Akteure nachträglich anzusiedeln.

Darüber hinaus sollten jedoch auch die grundlegenden Netzwerkeigenschaften potenzieller Recyclingstrukturen weiter untersucht werden. Hierfür bietet sich die Einbindung netzwerkanalytischer Werkzeuge wie beispielshalber Unternehmens-, Beziehungs- und Netzwerkdeskriptoren an.

Ein zentraler Bestandteil weiterer Forschungsaktivitäten sollte zudem die Vergleichbarkeit der ökologischen Auswirkungen einer Etablierung regionaler Recyclingnetzwerke zum Status quo oder einer Durchflussökonomie sein. Dies geht in besonderem Maße auch auf die materiellen und energetischen Einsparpotenziale in Abhängigkeit vom brancheninternen Rezyklierungspunkt nach Tabelle 5-15, Seite 506, Kapitel 5.3.9 zurück. In Verbindung mit der regionalspezifischen Altmodulmenge und der im Kapitel 6.4.2 schematisch dargelegten Kalkulation jährlich regional verfügbarer Sekundärrohstoffe aus dem Recycling zur Verwendung sowie zur Verwertung kristalliner Siliziumsolaraltmodule können die tatsächlichen Gesamteinsparpotenziale je Region sowohl jährlich als auch für definierte Zeiträume näherungsweise bestimmt werden. Mittels einer monetären Bewertung wären sonach auch volkswirtschaftliche Potenziale bezifferbar. Sollten darüber hinaus die tatsächlichen Verbräuche der genutzten Recyclingverfahren bekannt sein, ließe sich zudem eine ökobilanzielle Bewertung anschließen. Dies gilt zugleich für die mit der Dimensionierung des potenziellen Recyclingnetzwerkes desiderate Optimierung der Redistributionslogistik. Aus der gesamten Sachbilanz kann über Emissionsfaktoren so direkt eine Wirkungsabschätzung im Sinne einer Ökobilanz erzielt werden. Im Falle der Redistributionslogistik bieten sich Faktoren der Einheiten g-CO_2/Fahrzeugkilometer, g-CH_4/Fahrzeugkilometer oder g-N_2O/Fahrzeugkilometer zur Kalkulation beispielshalber des Treibhauspotenzials an [Choi und Fthenakis 2014], da sie direkt mit der zugrunde liegenden Entfernungsmatrix multipliziert werden können (vgl. hierzu Kapitel 5.4.3.2). Daraus geht evident hervor, dass ohne eine Optimierung der Sammel- und Transportlogistik sowie einer damit einhergehenden idealen Standortwahl eine Minimierung der ökologischen Auswirkungen eines Recyclingnetzwerkes nicht möglich ist. Zudem sind so auch alle regional auftretenden ökologischen Effekte darstellbar, da die Strukturen sich inklusive der Logistik auf ein definiertes Gebiet beschränken. Je nach Auslegung der einzelnen Netzwerkparameter können so entweder regionalspezifische ökologische Vorteile oder gar Nachteile verglichen zum Status quo oder einer Durchflussökonomie identifiziert werden.

Ferner sollten neben diesen eher konkreten Forschungsbeiträgen die potenziellen Netzwerkstrukturen auch allgemein hinsichtlich ökologischer Fragestellungen untersucht werden. Dabei kann eine ökologieorientierte Bewertung der Strukturen eines Recyclingnetzwerks durch Näherungs- und Flächenmaße, Punkteschemata sowie auswirkungsorientierte Verfahren fokussiert werden, wobei sich jedoch nicht alle Ansätze gleichermaßen anbieten; sie sind je nach Betrachtungsgegenstand individuell auszuwählen. Die bekanntesten Vertreter der jeweiligen Gruppen sind nachstehend kurz beschrieben, wobei für vertiefende Diskussionen und eine kritische Analyse zur Eignung der einzelnen Ansätze auf [Posch 2006, S. 200ff] verwiesen wird. Zu den Näherungsmaßen der ökologieorientierten Bewertung zählt beispielshalber das Konzept des kumulierten Energieaufwandes (kurz: KEA). Hierbei werden Produkte oder Dienstleistungen nach dem kumulierten Energieaufwand bewertet und vergleichbar gemacht, wobei ein niedrigerer Wert eine gesteigerte Ökologieorientierung signalisiert. Ein weiterer Ansatz aus der Gruppe der Näherungsmaße ist das vom Wuppertal Institut für Umwelt, Klima und Energie entwickelte Konzept des Material-Inputs pro Serviceeinheit (kurz: MIPS). Dieser Ansatz dient der Ermittlung der Intensität der Umweltbelastung über den gesamten Lebenszyklus einer Dienstleistung, von Gütern oder gar Infrastrukturen. Analog des kumulierten Energieaufwandes steigt die ökologische Bewertung mit sinkendem MIPS-Wert. Als Flächenmaße sind insbesondere das Konzept des ökologischen Fußabdruckes und der „Sustainable Process Index“ (kurz: SPI) aufzuführen. Im Gegensatz zu den vorbenannten Ansätzen eignet sich der SPI nicht zur ökologieorientierten Bewertung von Gütern; laut [Posch 2006, S. 204f] hingegen jedoch zur Ermittlung des ökologischen Einflusses von Regionen, Betrieben oder Prozessen. Zur Gruppe der Punkteschemata zählen die Ermittlung der Umweltbelastungspunkte (kurz: UBP) sowie der Schadschöpfungseinheiten (kurz: SE). Bei der Methode der Umweltbelastungspunkte werden grundlegend für einzelne Schadstoffe die Ist- und Toleranzmengen ins Verhältnis gesetzt. Die Toleranzmenge ist dabei durch nationale oder internationale Grenzwerte definiert, wobei die Ist-Menge den tatsächlichen Schadstoffffluss im Referenzgebiet beschreibt. Im Gegensatz dazu berücksichtigt die Methode der Schadschöpfungseinheiten lediglich die Outputs und keinerlei systemrelevante Inputs. Auswirkungsorientierte Verfahren sind beispielshalber die CML-Methode[180], welche die Rangfolge gewichteter Wirkungskategorien wie die Erschöpfung

[180] CML ist die Abkürzung von „Centrum voor Milieukunde“ der Universität Leiden – dort wurde die Methode entwickelt.

abiotischer Ressourcen (ADF), das Treibhauspotenzial (GWP), das stratosphärische Ozonabbaupotential (ODP), Humantoxizität (HC), aquatische (ECA) und terrestrische (ECT) Ökotoxizität, das Versauerungs- und das Eutrophierungspotenzial (AP und NP) zum Ergebnis hat. Ein weiterer prominenter Vertreter ist der ECO-Indikator 99. Dieser fasst die ökologische Wirkung der Stoff- und Energieflüsse eines Produktes oder Systems in den Schadenskategorien Ressourcenvorrat, Ökosystemqualität und Humangesundheit zusammen. Als letzter Vertreter zur ökologieorientierten Bewertung potenzieller Recyclingnetzwerke sei noch das EPS-Modell (Environmental priority strategy) zur Bewertung von Ökobilanzen erwähnt, welches den Schaden durch ein Produkt auf die Schutzgutklassen finanziell bewertet.

In toto gehen potenzielle Umweltvorteile einer regionalen Etablierung ökologisch hochwertiger Recyclingansätze laut [Fthenakis und Moskowitz 1999] auf Einsparungen bei der zu deponierenden Masse, der Energie, von Emissionen und von Rohstoffen zurück. Dabei werden Energieeinsparungen zumeist in eingesparte CO_2-Äquivlente umgerechnet. Eine wesentliche Forschungslücke ist demnach die derzeit ausstehende ökologieorientierte Bewertung einer regionalen Etablierung der definierten Recyclingstrukturen und deren ausgiebige Diskussion.

Des Weiteren ist auch eine Untersuchung der möglichen Auswirkungen und Effekte im Zusammenhang mit der freiwilligen regionalen Verantwortung durch den Ansatz der Corporate Social Responsibility (kurz: CSR) und dem daraus hervorgehendem Potenzial zur direkten Erhöhung der regionalen Wertschöpfung, der Schaffung von Arbeitsplätzen und der Impulssetzung für die Entwicklung des Netzwerkumfeldes [Posch 2006, S. 172ff] zu fokussieren.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass eine Analyse der volkswirtschaftlichen Auswirkungen und Aspekte einer Etablierung potenzieller Netzwerke für das Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule oder einer Ausweitung von Multimaterialrecyclingnetzwerken auf Basis der auch in dieser Arbeit generierten Ergebnisse als erhöhter Forschungsbedarf identifiziert wurde. Dies gilt gleichwohl für alle benannten Problematiken, Herausforderungen und Forschungslücken dieses Hauptkapitels ex aequo. Die adäquate Fortführung der Untersuchung dieser essenziellen Fragestellungen sollte zudem noch innerhalb der kurzfristigen Planungsphase fokussiert werden – nicht zuletzt ob des eindeutig nachgewiesenen hohen Wachstumspotenzial des (regionalen) Marktes kristalliner Siliziumsolaraltmodule.

KAPITEL 7

ZUSAMMENFASSENDE SCHLUSSBETRACHTUNGEN

In diesem Kapitel werden abschließend die behandelten Thematiken, die erzielten Fortschritte und die zentralen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit resümiert, wobei die Bereitstellung einer adäquaten und sachdienlichen Diskussionsbasis das essenzielle Fundament darstellte. Dies begreift nicht nur die Aufarbeitung der desideraten physikalischen Grundlagen hin zur Beschreibung des photovoltaischen Effektes ein. Auch fachspezifische und betrachtungsrelevante Aspekte wie die konstitutiven Zellentechnologien, die Historie der terrestrischen Applikation und die Marktverteilung der einzelnen technologischen Ansätze wurden diskutiert und auf den aktuellen Stand der Wissenschaft geprüft. Darauf aufbauend konnten ein repräsentatives kristallines Standardsiliziumsolarmodul definiert und eine charakteristische Produktionssequenz entlang der Siliziumsurrogate auf die substanziellen Energie- und Materialströme hin untersucht werden. Dabei grenzt sich die vorliegende Arbeit bereits auf dieser Ebene vom Gros der verfügbaren themenspezifischen Literatur durch die gewählte Tiefe der theoretischen Grundlagen sowie der unabhängigen Darstellung und Bewertung der Prozessparameter ab. Gleichwohl werden auch verfahrenstechnische Neuentwicklungen

mitbetrachtet, was in der Konsequenz auch diesbezüglich den Stand der Wissenschaft wiedergibt. Infolge der detaillierten Betrachtung der Produktionssequenz eines kristallinen Standardsiliziumsolarmoduls konnten zudem produktionsspezifische Faktoren herausgearbeitet werden. Diese ermöglichen die Analyse der Produktionssequenz hinsichtlich etwaiger Potenziale, welche beispielshalber mit einer Rezyklierung einzelner Ingredienzien, vor allem jedoch der Funktionsmaterialien, einhergehen. Zugleich können mithilfe dieser Faktoren nicht nur potenzielle Auswirkungen der Wiederverwendung oder -verwertung einzelner Materialien identifiziert, sondern auch quantifiziert werden. Dies ist letztlich die Voraussetzung für den späteren Vergleich einer reinen Neuproduktion mit einem hochwertigen Recyclingansatz bezüglich der idealisierten energetischen- und materiellen Einsparpotenziale; auch mit Blick auf die Produktionssequenz selbst.

Der hauptsächliche Erkenntnisgewinn geht indessen auf den zentralen Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit zurück: das Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule unter Beachtung regionaler Gegebenheiten. In einem ersten Schritt wurden hierfür die aktuell geltenden gesetzlichen Rahmenbedingungen auf rechtliche Restriktionen und Obliegenheiten hin überprüft, zusammengefasst und diskutiert. Wie bereits in der initialen Literaturanalyse aufgezeigt, stellt sich die verfügbare Datenbasis für eine fundierte Diskussion aller weiteren Aspekte des Recyclings kristalliner Siliziumsolaraltmodule als unzureichend dar. Deshalb kam der Generierung einer eigenen qualitativ adäquaten Datenbasis essenzieller Charakter zu. Dies begriff in einem zweiten Schritt vordergründig die Entwicklung eines Prognosemodells auf Basis des Standes der Wissenschaft und daraus abgeleiteten Annahmen ein. Fundament des Modells bilden einerseits die Nutzung einer Weibullverteilungsfunktion und die Kenntnis der Defektwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Installationshistorie kristalliner Siliziumsolarmodule zur wissenschaftlichen Beschreibung einer potenziellen Absterbekurve. Andererseits erfolgte eine Differenzierung in Module, die bis 2013 installiert wurden, sowie Module, die ab 2013 installiert wurden und werden. Dies soll der Tatsache Rechnung tragen, dass kristalline Siliziumsolarmodule unterschiedlicher Fertigungszeiträume mitunter grundlegend im Aufbau, in deren stofflichen Zusammensetzung (sowohl qualitativ als auch quantitativ) sowie dem neuralgischen Verhalten voneinander abweichen. Dazuhin wurden auch die regionalspezifische Installationsdichte sowie Effekte, die zukünftige Marktentwicklungen zeitigen können, beachtet. Dieses Prognosemodell zur wissenschaftlich begründeten Prädiktion annueller und technologiespezifischer Altmodulströme

stellt einen zentralen Forschungsbeitrag dieser Arbeit dar. Ein herauszustellendes Merkmal, welches das Prognosemodell zusätzlich von anderen Ansätzen abhebt, ist die Skalierbarkeit der regionalen Betrachtungsgrenzen. Die Aufbereitung und Diskussion der auf diese Weise gewonnen Daten erfolgte dabei mithilfe von Konfidenzintervallen; die Untersuchung möglicher Zusammenhänge und Wechselwirkungen mittels sogenannter „Heatmaps“. Weiter wurde das Konzept der Schatteninstallationen neu eingeführt und definiert, welches letztlich den Neuinstallationen aufgrund von Repowering oder dem Teilersatz von Anlagen gerecht wird.

Ein wesentliches Resultat aus der Anwendung des Modells ist, dass nicht vor dem Jahr 2028 mit dem Einsetzen eines konstanten Massenstromes von PV-Altmodulen auszugehen ist – weder regional noch national. Dieser ist jedoch wiederum eine Grundvoraussetzung eines ökonomisch tragfähigen Betriebes einer potenziellen Recyclingaktivität. Daneben besitzen aber gleichwohl Faktoren wie der mögliche Erlös aus dem Recycling von PV-Modulen, die spezifischen Verfahrenskosten sowie etwaige Sammel- und Transportkosten einen essentiellen Charakter. Es resultiert sonach eine Abhängigkeit von mannigfaltigen Variablen wie beispielshalber den Rohstoffpreisen, den Anforderungen möglicher Absatzmärkte, den sich aus der Verfahrensspezifik ergebenden Kosten sowie der Installationsdichte kristalliner Siliziumsolarmodule (bedingt letztlich den benötigten Einzugsradius). Aufgrund der derzeitig nur begrenzt vorhandenen Erfahrungswerte mit dem Recycling von Photovoltaikaltmodulen infolge des bisweilen fehlenden industriellen oder praxisnahen Einsatzes kommt jedoch den meisten Variablen eine enorme Unsicherheit zu. Dabei scheint gleichwohl die Nutzung von Erfahrungs- oder Näherungswerten aus anderen etablierten Branchen ob der Spezifik der Technologie als nicht zielführend. Besonders Kosten und Erlöse betreffend ergibt sich eine vom spezifischen Verfahrensansatz abhängige Schwankungsbreite. Dabei resultieren bereits aus der Unterscheidung in den Status quo der Altmodulverwertung und in hochwertige Recyclinglösungen enorme Potenziale – sowohl ökologisch als auch ökonomisch. Mit dem Einsetzen der Massenströme zeigt sich hingegen eine deutliche Steigerung annuell zur Verfügung stehender Altmodulquantitäten, welche sich bei zunehmender Regionalisierung allerdings auch zunehmend hinsichtlich Stetigkeit, Ausprägung sowie Zusammensetzung voneinander unterscheiden und sonach regionalspezifische Auswirkungen zeitigen.

An die Prognose und die Auswertung annueller Altmodulströme für verschiedene regionale Ausprägungen schloss sich in einem dritten Schritt die Untersuchung der verschiedenen erprobten, im Labormaßstab betriebenen oder mitunter auch nur rein theoretisch existierenden technologischen Verfahrensansätze zum Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule an, wiederum auch zum Teil mit dem Ziel der Beschreibung des Standes der Wissenschaft. Zusammen mit der Kenntnis der Produktionssequenz zur Neuproduktion des definierten kristallinen Standardsiliziumsolarmoduls resultierte daraus aber auch die Möglichkeit der gezielten Identifikation energetischer und materieller Einsparpotenziale eines Recyclings zur Verwendung gegenüber einem Recycling zur Verwertung oder eben jener reinen Neuproduktion. Zudem konnten so ebenfalls sich etwaige ergebende bilanzielle Mehrbelastungen infolge der Etablierung einer Recyclingaktivität oder aus der steten Fortentwicklung der Produktionstechnologien (speziell hinsichtlich energetischer Einsparungen) ausgemacht und benannt werden. Je nach verfahrenstechnischen Recyclingansatz samt zugrunde liegender Ausbeute und erzielbarer Reinheiten, dem Rezyklierungspunkt in die brancheninterne Produktionssequenz sowie den zu erwartenden Realverbräuchen sind die idealisierten energetischen und materialspezifischen Einsparpotenziale jedoch unterschiedlich ausgeprägt. Dabei wurde nicht nur zwischen dem Status quo der Altmodulentsorgung und einem etwaigen hochwertigen Recyclingansatz, welcher auch die Funktionsmaterialien der kristallinen Siliziumsolaraltmodule mit einbegreift, differenziert, auch innerhalb der Recyclingansätze erfolgte eine Unterteilung in ein Recycling zur Verwendung und ein Recycling zur Verwertung in Abhängigkeit des potenziell resultierenden Rezyklierungspunktes der Outputfraktionen.

Allerdings konnte keine (zumindest aus theoretischer Perspektive) technische Restriktion als Hemmnisfaktor ausgemacht werden. Dieserhalb wurde in einem vierten Schritt das Hauptaugenmerk auf die Analyse der ökonomischen Gegebenheiten gelegt. Dabei wird die zuvor getroffene Zweiteilung der Betrachtung in ein Recycling zur Verwendung und ein Recycling zur Verwertung beibehalten, nicht zuletzt um einerseits ökonomische Unterschiede beider Verfahren und andererseits die Potenziale und Risiken, die eine Variation des verfahrenstechnischen Ansatzes zeitigen kann, zu identifizieren, zu benennen und unter Umständen auch zu bewerten. Eine zentrale Erkenntnis aus deren Vergleich ist, dass ein Recycling zur Verwendung höhere idealisierte Einsparpotenziale als ein Verwertungsansatz besitzt – zumindest hinsichtlich einer brancheninternen Rezyklierung

der Sekundärrohstoffe oder -materialien. Bei einem branchenexternen Vertrieb sind die Ausprägungen dieser Einsparmöglichkeiten zudem abhängig vom jeweiligen Markt. In toto wurde jedoch eine ökonomische und ökologische Dominanz des Recyclings$_{VN}$ über ein Recycling$_{VR}$ identifiziert. Die ökonomischen Vorteile werden jedoch mitunter durch die ungleich höheren unternehmerischen Risiken eines Recycling$_{VN}$ kompensiert. Dies geht insbesondere auf die hohen Anforderungen eines Recyclings zur Verwendung an den qualitativen Zustand der Altmodule als Prozessinput zurück. Gleiches gilt für die diskutierten Schwierigkeiten von Ansätzen zur Wieder- oder Weiterverwendung bei der Generierung hoher Rückgewinnungsquoten oder Ausbeuten von ganzen und funktionstüchtigen kristallinen Siliziumsolarwafern infolge marktgetriebener Anreize seitens der Produzenten hin zu immer dünner werdenden Schichtdicken oder der Veränderungen der Flächenmaße in allen Dimensionen. Darauf aufbauend gelang zuerst die Wirtschaftlichkeit einer fiktiven Recyclingaktivität im laufenden Betrieb in den Fokus, wofür ein theoretischer Betrachtungsrahmen definiert wurde. Aus der Unterstellung, dass die langfristige Existenz einer Recyclingaktivität eine Gewinnerwirtschaftung, mindestens jedoch die Parität der Kosten und Erlöse, voraussetzt, konnte eine Diskussion wichtiger betriebswirtschaftlicher Einflussfaktoren erfolgen. Dabei bildeten nicht nur die Erlöspotenziale aus dem Absatz des Prozessoutputs der beiden Recyclingvarianten sowohl branchenintern wie auf branchenexternen Absatzmärkten einen Untersuchungsschwerpunkt, auch die bislang völlig unbekannten Verfahrenskosten aus dem Betrieb einer Recyclinganlage und mögliche Sammel- und Transportkosten der Beschaffungslogistik wurden intensiv analysiert. Zur Betrachtung der einzelnen ökonomischen Aspekte kam indessen nicht nur ein genereller Ansatz zum Einsatz, es wurden auch reale Einzelfallbeispiele herangezogen; exemplarisch erfolgte eine Standortoptimierung anhand einer regionalen Eingrenzung auf das ostdeutsche PV-Produktionscluster. Gleichwohl standen auch Einflüsse auf die Menge regional verfügbarer Altmodule, wie beispielshalber ein sich ergebender Zweitmarkt, im Blickpunkt.

Sonach können mit Fokus auf ein Recycling zur Verwertung und auf das ostdeutsche PV-Produktionscluster, beziehungsweise die dadurch definierte Region, unter der Bedingung der Vollauslastung der bereitgestellten Recyclingkapazitäten in der kurz- und mittelfristigen Planungsphase maximal 1.450 Tonnen je Jahr als aktivitätsspezifische Kapazitäten vorgehalten werden. Mittels einer Standortoptimierung konnte dabei vor allem die Region um die Knoten R19, R11, R1, R5 und R7 als idealer weil kosten-

minimaler Anlagenstandort identifiziert werden. Dies entspricht realiter dem sächsischen Gebiet zwischen Freiberg, Dresden, Nossen und Chemnitz. Mit dem prognostizierten Eintreten der Massenströme nach dem Jahre 2036 kann davon ausgegangen werden, dass sich unter sonst gleichen Rahmenbedingungen bereits eine Recyclingkapazität von 5.000 Tonnen je Jahr vollauslasten lässt. Bei einer Vergrößerung des Einzugsgebietes auf die definierte Region Sachsen samt deutschseitiger Anrainer würde sich sogar eine Kapazitätserweiterung auf 20.000 Tonnen je Jahr unter Vollauslastung anbietet, wobei die eben genannten Anlagenstandorte weiterhin überzeugende transportwirtschaftliche Ergebnisse erzielen. Wird hingegen beispielshalber nur Sachsen als Einzugsgebiet präferiert, wäre trotzdem eine Kapazitätserweiterung auf 2.500 Tonnen je Jahr möglich. Ein vollkommen anderes Ergebnis ergibt sich allerdings mit Fokus auf ein Recycling zur Verwendung. Obschon solche Recyclingansätze höhere Absatzerlöse aus dem Verkauf des Prozessoutputs generieren können, kommen an dieser Stelle die benannten und ungleich höheren unternehmerischen Risiken zum Tragen.

Die so erzielten betriebswirtschaftlichen Einzelergebnisse wurden sodann in einem statischen Modell diskutiert und auf Wechselwirkungen hin analysiert. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend wurden die berechneten Einzelwerte in ein dynamisches Modell überführt. Dies hatte zum Ergebnis, dass bereits heute genügend Altmodule auch regional verfügbar sind, um die Gewinnschwelle einer Recyclingaktivität im laufenden Betrieb zu überschreiten. Es konnte sonach vorerst auch auf betriebswirtschaftlicher Ebene keine Erklärung für die gegenwärtige Disproportionalität zwischen der verfügbaren Technologie eines ökologisch hochwertigen Recyclings kristalliner Siliziumsolaraltmodule, welches auch die Funktionsmaterialien einbegreift, und deren realen Anwendungsspektrum gefunden werden. Nach der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit einer fiktiven Recyclingaktivität im laufenden Betrieb war daher auch die initiale Investitionsentscheidung mit in die Betrachtung einzuschließen. Hierfür wurde das finanzmathematische Entscheidungskriterium des Nettogegenwartswertes um das Konzept der Break-evens erweitert. Aus der Anwendung dieses ökonomischen Modells samt finanzmathematischer Entscheidungsvariable ergaben sich eine Vielzahl konkreter Erkenntnisse. So zeigte sich, dass derzeit zwar regional genügend Altmodule zur Überschreitung der Gewinnschwelle verfügbar sind. Aus der ökonomischen Analyse der Break-evens der Nettogegenwartswerte wurde jedoch deutlich, dass diese in ihrer Höhe nicht ausreichen, um eine initiale Investitionsempfehlung unter sinnvollen Rahmenbedingungen zu gener-

ieren. Die Break-evens der Nettogegenwartswerte zusammen mit den geringen annuell verfügbaren Altmodulmengen konnten sonach als zentrale ökonomische Hemmnisfaktoren für benannte Disproportionalität identifiziert werden.

Dieser gegenwärtige Hemmnisfaktor für die Initiierung einer hochwertigen Recyclingaktivität zur Verwertung beispielshalber in den Grenzen des ostdeutschen PV-Produktionsclusters kann indessen auch infolge konstruktionsbedingter Anpassungsmaßnahmen abgemildert werden. Hierfür wurden in einem fünften Schritt sodann konstruktionsbedingte Beeinflussungen der einzelnen ökonomischen Aspekte fokussiert. Dies begreift sowohl die konkreten Auswirkungen des Einsatzes recyclingorientierter Moduldesigns auf die Break-evens der Nettogegenwartswerte als auch sich daraus ergebende Chancen und Risiken mit ein. So können bestimmte Maßnahmen die spezifischen Risiken eines $\text{Recycling}_{\text{VN}}$, die trotz wesentlich besseren Bedingungen hinsichtlich der finanzmathematischen Investitionsempfehlung im Vergleich zu einem $\text{Recycling}_{\text{VR}}$ eine reale Investition bisweilen verhindern, durchaus erheblich senken. Die Gesamtheit der untersuchten Anpassungsmaßnahmen einschließlich der Etablierung eines recyclingorientierten Moduldesigns können letztlich nicht nur Chancen generieren, sie besitzen auch das Potenzial negative Auswirkungen zu zeitigen, welche sich in Hinblick auf das $\text{Recycling}_{\text{VR}}$ und das $\text{Recycling}_{\text{VN}}$ sowohl in der Verstärkung potenzieller ökonomischer Risiken als auch in der Generierung zusätzlicher Hemmnisse äußern können. Zudem wurde der Einfluss anstehender marktgetriebener Materialsubstitutionen, respektive die Reduktionen spezifischer Ingredienzien sowie deren Realisationswahrscheinlichkeit geprüft. Neben den Auswirkungen wurden jedoch auch Lösungsstrategien auf ihre Tauglichkeit hin untersucht. Ein prominentes Beispiel zur Reduktion der Risiken für Recycler aus der steten Fortentwicklung der Photovoltaiktechnologie findet sich in der Standardisierung der Produkte; genauer der Produkttypung. Aber auch die erweiterte Kennzeichnung kann ihren Beitrag zur Senkung spezifischer Risiken leisten.

Die identifizierten Hauptproblematiken, die entweder die initiale Investition verhindern oder die wirtschaftlichen Risiken aus dem Betrieb einer Anlage zu hoch erscheinen lassen, sind neben dem derzeit noch zu geringen Altmodulaufkommen, die Zeitverschiebung in der Produktions- und Recyclingtechnologie sowie die schlechten Investitionsbedingungen. Darüber hinaus konnten indessen noch zahlreiche weitere hemmend wirkende Faktoren ausgemacht werden. Diese umfassen beispielhalber die ungleich höheren Risiken eines $\text{Recycling}_{\text{VN}}$ gegenüber einem $\text{Recycling}_{\text{VR}}$, welche die ökonomische

Dominanz des $Recycling_{VN}$ derzeit nicht auszugleichen vermag. Aber auch die mit der Etablierung geeigneter Recyclingstrukturen verbundenen zusätzlichen Kosten zur notwendigen Vorsortierung der Altmodule nach dem technologisch zugrunde liegenden Modulaufbau aufgrund der Technologiediversität wirken sich hemmend aus. Zudem sind die fehlenden rechtlichen Anreize auf stofflicher Ebene der Etablierung geeigneter Strukturen nicht förderlich. Darüber hinaus stellt die Volatilität der Marktpreise für Primärrohstoffe ein unkalkulierbares Risiko für speziell ausgerichtete Recycler dar. Ein weiterer hemmend wirkender und nicht minder wichtiger Faktor ist zugleich auch die Unkenntnis der realen Bedingungen und die geringe Verfügbarkeit adäquater und stichhaltiger Informationen.

Neben der Untersuchung der potenziellen Umsetzbarkeit eines hochwertigen Recyclingansatzes auf regionaler Ebene waren darüber hinaus auch Schlussfolgerungen zu einem etwaigen regionalen Nutzen Gegenstand der vorliegenden Arbeit. So kann infolge der Etablierung einer oder mehrerer speziell ausgerichteter Recyclingaktivitäten eine künstliche Rohstoffsenke generiert werden. Besonders die Photovoltaikbranche selbst könnte davon enorm profitieren. Ein branchenintern agierender Recycler könnte einerseits als Aufnahmemedium von Produktionsabfällen und als Entsorger potenziell anfallender Altmodule (der Novellierung des ElektroG entsprechend) fungieren. Andererseits könnte er als regional ansässiger Lieferant von Rohstoffen, welche bei einem Recycling zur Verwendung speziell auf die brancheninternen Anforderungen zugeschnitten anfallen, zu einem regionalen Standortvorteil beitragen. Es könnten sonach sowohl mögliche Versorgungsunsicherheiten regional ansässiger Unternehmen gesenkt, als auch deren Entsorgungsunsicherheit reduziert werden.

In toto lässt sich konstatieren, dass die aufgeworfenen Forschungsfragen beantwortet; etwaige Hemmnisfaktoren identifiziert und weiterführende Fragestellungen diskutiert wurden. Zudem konnte eine sinnvolle Datenbasis generiert werden, welche sich für nachfolgende Arbeiten, besonders hinsichtlich der Adressierung des benannten weiteren Forschungsbedarfs, qualitativ von der sonstigen Literatur absetzt. Allerdings bleibt zu betonen, dass aufgrund der Volatilität des Marktes in all seinen Facetten jederzeit imponderable und sprunghafte Veränderungen aller Grundlagendaten auftreten können. Diese haben das Potenzial die erzielten Ergebnisse, darauf aufbauende Schlussfolgerungen sowie etwaige Empfehlungen entscheidend zu verändern und eine Neubewertung entsprechend notwendig werden zu lassen.

LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

Kapitel 1

Behrendt, Siegfried; Erdmann, Lorenz; Marwede, Max und Caporal, Sophie. 2010. *Roadmap: Ressourceneffiziente Photovoltaik 2020+*. Wuppertal, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Ressourceneffizienz Paper 9.1, Arbeitspaket 9 des Projekts: Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRess). 152 Seiten.

Bernreuter, Johannes. 2002. *Mehrfache Ernte.* 4. Artikel der Reihe: Killerargumente widerlegen. Photon, 12. Dezember 2002. Seite 49-53.

Birnbaum, Heinz; Schütze, Bruno; Städtler, Werner; Lindner, Helmut; Drath, Raimund; Haase, Paul; Estel, Ernst; Pohlenz, Werner; Boesler, Joh.; Stapf, Helmut; Nell, Walter und Sutaner, Hans. 1959. *Das Grundwissen des Ingenieurs.* Leipzig, Fachbuchverlag Leipzig. 961 Seiten.

Bony, Lionel und Newman, Sam. 2010. *Achieving Low-Cost Solar PV: Industry Workshop Recommendations for near-term Balance of System cost reductions.* Snowmass, CO, USA. Rocky Mountain Institute. 2010. 26 Seiten.

Cassignol, E.J. 1966. *Halbleiter.* Band 1. Physik und Elektronik. Philips technische Bibliothek, 1966. 322 Seiten.

Choi, Jun-Ki und Fthenakis, Vasilis. 2010. *Design and Optimization of Photovoltaics Recycling Infrastructure.* Environmental Science & Technology, Band 44, Heft 22, 15. November 2010. Seite 8678-8683.

Choi, Jun-Ki und Fthenakis, Vasilis. 2014. *Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives.* Journal of Cleaner Production, Band 66, März 2014, Seite 443-449.

Cucchiella, Federica; D'Adamo, Idiano und Rosa, Paolo. 2015. *End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, Band 47, Juli 2015, Seite 552-561, ISSN 1364-0321.

De Wild-Scholten, M. J., Alsema, E. A., ter Horst, E. W., Bächler, M. und Fthenakis, V. 2006. *A cost and environmental impact comparision of grid-connected rooftop and ground based PV systems.* In Veröffentlichungen von: 21th European Photovoltaic Energy Conference. Dresden, Deutschland, 04.09-08.09.2006.

Enderlein, Rolf und Schenk, Andreas. 1992. *Grundlagen der Halbleiterphysik*. Berlin, Akademie Verlag GmbH. 396 Seiten. ISBN: 3-05-501400-6.

Fischer, Janine. 2011. *Theoretische Grundlagen zur Vorbereitung des F-Praktikumsversuchs: Solarzelle.* geänderte Version durch Kraner, Stefan am 12.10.2012, Technische Universität Dresden, Institut für Angewandte Photophysik. 27. Seiten.

Foitzik, Leonhard und Hinzpeter, Hans. 1958. *Sonnenstrahlung und Lufttrübung.* Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G. 309 Seiten.

Fraas, Lewis und Partain, Larry. (Ed.) 2010. *Solar Cells and Their Applications.* second edition. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., Wiley series in microwave and optical engineering. 627 Seiten. ISBN: 978-0-470-44633-1.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE). 2012. *Jahresbericht 2012.* Freiburg, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. 189 Seiten.

Friege, Henning und Kummer, Beate. 2012. *Ressourcenschonung am Beispiel der Elektro- und Elektronikaltgeräte: III. Photovoltaik-Module.* Müll und Abfall, Ausgabe 9/2012. Seite 456-463.

Fthenakis, Vasilis. 2000. *End-of Life Management and Recycling of PV Modules.* Energy Policy, Band 28, 2000. Seite 1051-1058.

Goetzberger, A. und Hoffmann, V.U. 2010. *Photovoltaic Solar Energy Generation.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, optical sciences. 232 Seiten. ISBN: 978-3-642-06260-5.

Green, Martin A.; Emery, Keith; Hishikawa, Yoshihiro; Warta, Wilhelm und Dunlop, Ewan D. 2015. *Solar cell efficiency tables (version 47).* Accelerated publication. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Band 24, Heft 1. Wiley Online Library. Seite 3-11.

Grundmann, Marius. 2006. *The Physics of Semiconductors, An Introduction Including Devices and Nanophysics.* Springer-Verlag Berlin-Heidelberg. 689 Seiten. ISBN: 3-540-25370-X.

Häckel, Hans. 2005. *Meteorologie.* 5., völlig überarbeitete Auflage. Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart. 447 Seiten. ISBN: 3-8252-1338-2.

Hupfer, Peter und Kuttler, Wilhelm. 2006. *Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie.* 12. überarbeitete Auflage. Wiesbaden, B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlag GmbH. 554 Seiten. ISBN: 3-8351-0096-3.

Jungbluth, Niels; Stucki, Matthias; Flury, Karin; Frischknecht, Rolf und Büsser, Sybille. 2012. *Life Cycle Inventories of Photovoltaics.* Uster, Schweiz, ESU-services Ltd. Report, Version: 2012. 238 Seiten.

Kaltschmitt, Martin und Rau, Uwe. 2005. *Physikalische Grundlagen.* In: Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang und Wiese, Andreas (Hrsg.). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 3-540-28204-1. Seite 197-205.

Kaltschmitt, Martin; Sauer, Dirk Uwe; Rau, Uwe; Preiser, Klaus und Roth, Werner. 2005a. *Systemtechnische Beschreibung.* In: Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang und Wiese, Andreas (Hrsg.). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 3-540-28204-1. Seite 206-257.

Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang und Wiese, Andreas (Hrsg.). 2005b. *Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte.* 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 702 Seiten. ISBN: 3-540-28204-1.

King, R.R. und Sinton, R.A. und Swanson, R.M. 1989. *Doped surfaces in one sun, point-contact solar cells.* Applied Physics Letters, Band 54, Heft 15, 10 April 1989. Seite 1460-1462.

Kraus, Helmut. 2004. *Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie.* 3. erweiterte und aktualisierte Auflage. Berlin, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg. 422 Seiten. ISBN: 3-540-20656-6.

Latunussa, Cynthia E. L.; Mancini, Lucia; Blengini, Gian Andrea; Ardente, Fulvio und Pennington, David. 2016. *Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels.* Luxemburg (Luxemburg), Publications Office of the European Union, März 2016. JRC Technical Reports. 83 Seiten. ISBN: 978-92-79-57277-7.

Li, J., Lopez, B. N., Liu, L., Zhao, N., Yu, K. und Zheng, L. 2013. *Regional or global WEEE recycling. Where to go?.* Waste Management, Band 33, Heft 4, April 2013, Seite 923-934.

Liljequist, H. und Cehak, Konrad. 2006. *Allgemeine Meteorologie.* 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Braunschweig, Wiesbaden, Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH. 396 Seiten. ISBN: 3-540-41565-3.

Lobbe. 2012. *Entsorgungsunternehmen stellt Weichen für Recycling von Photovoltaikmodulen.* Müll und Abfall, Band 44, Heft 2, 2012. Seite 109.

Marwede, M., Berger, W., Schlummer, M., Mäurer, A. und Reller, A. 2013. *Recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste – current feasible processes.* Renewable Energy, Band 55, 2013. Seite 220-229.

McEvoy, A., Markvart, T. und Castaäner, Luis. (Ed.) 2012. *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications.* Second edition. Oxford, UK, Academic Press, Elsevier Ltd. 1244 Seiten. ISBN: 978-0-12-385934-1.

Mertens, Konrad. 2011. *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis.* München, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. 290 Seiten. ISBN: 978-3-446-42172-1.

MicroChemicals GmbH. 2012. *Silizium Wafer.* In: http://www.microchemicals.com/fileadmin/user_upload/silicon_wafers.pdf, abgerufen: 14.08.2013.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2015. *Best Research-Cell Efficiencies.* In: https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png, Stand: 10.12.2015.

Odden, J. O., Halvorsen, G., Rong, H. und Gløckner, R. 2008. *Comparison of the energy consumption in different production processes for solar grade silicon.* In: Øye, Harald A. 2008. Silicon for the Chemical and Solar Industry IX. Oslo, Norway. 16 Seiten.

Poortmans, Jef und Arkhipov, Vladimir. 2006. *Thin Film Solar Cells: fabrication, characterization, and applications.* Chichester, England, John Wiley & Sons, Ltd. Wiley Series in Materials for Electronic & Optoelectronic Applications. 471 Seiten. ISBN: 0-470-09126-6.

Sander, Knut; Zangl, Stéphanie; Reichmuth, Matthias und Schröder, Gerd. 2004. *Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung.* Hamburg / Leipzig. Ökopol - Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg & IE – Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig. Umwelt-Forschungs-Plan, FKZ 202 33 304, Endbericht. 109 Seiten.

Sander, Knut; Schilling, Stephanie; Wambach, Kartsen; Schlenker, Sylke; Müller, Anja; Springer, Johann; Fouquet, Dörte; Jelitte, Andrea; Stryi-Hipp, Gerhard und Chrometzka, Thomas. 2007. *Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystem für photovoltaische Produkte.* Hamburg, Ökopol GmbH, November 2007. Gefördert durch das BMU: Förderkennzeichen 03MAP092. 199 Seiten.

Schmidt, Manfred. 2002. *Regenerative Energien in der Praxis.* Berlin, HUSS-MEDIEN GmbH, Verlag Bauwesen. 248 Seiten. ISBN: 3-3456-00757-6.

Sze, S.M. und Ng, Kwok K. 2007. *Physics of Semiconductor Devices.* Dritte Auflage. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. 815 Seiten. ISBN: 0-471-14323-5.

West, R. 2003. *PV Inverter Products Manufacturing and Design Improvements for Cost Reduction and Performance Enhancements.* Golden, USA. National Renewable Energy Laboratory. NREL/SR-520-35885. 84 Seiten.

Yablonovitch, Eli und Cody, George D. 1982. *Intensity Enchancement in Textured Optical Sheets for Solar Cells.* IEEE Transactions on Electron Devices. Band 29, Heft 2, Februar 1982. Seite 300-305.

Yablonovitch, Eli. 1982. *Statistical ray optics.* Journal of the Optical Society of America, Band 72, Heft 7, Juli 1982. Seite 899-907.

Zechner, Christoph. 1999. *Mechanisch texturierte Solarzellen und Rückkontakt-Solarzellen aus kristallinem Silizium.* Universität Konstanz, Fakultät für Physik, Dissertation. Dezember 1999. 145 Seiten.

Kapitel 2

Becker, Frank-Michael; Boortz, Gunter; Dietrich, Volkmar; Engelmann, Lutz; Ernst, Christine; Fanghänel, Günter; Höhne, Heinz; Lenertat, Rudi; Liesenberg, Günter; Meyer, Lothar; Pews-Hocke, Christa; Schmidt, Gerd-Dietrich; Stamm, Reinhard und Weber, Karlheinz. 2000. *Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen I und II.* 8. überarbeitete Auflage. Berlin, Paetec Gesellschaft für Bildung und Technik mbH. 123 Seiten. ISBN: 3-89517-253-7.

Cassignol, E.J. 1966. *Halbleiter.* Band 1. Physik und Elektronik. Philips technische Bibliothek, 1966. 322 Seiten.

Chen, Chia-Wie; Hao, Ruiying; Upadhyaya, Vijaykumar D.; Ravi, T. S. und Rohatgi, Ajeet. 2016. *Development of high-efficiency large-area screen-printed solar cells on direct kerfless epitaxially grown monocrystalline Si wafer and structure.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Band 24, Heft 8, August 2016. Seite 1133-1141.

Deutscher Wetterdienst (DWD). o.J. *Globalstrahlungskarten, Mittlere Monats- und Jahressummen, Zeitraum: März, Juli und November 1981 – 2010 sowie Jahressumme 2012..* In: http://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_mi.html, 06.02.2014.

Enderlein, Rolf und Schenk, Andreas. 1992. *Grundlagen der Halbleiterphysik*. Berlin, Akademie Verlag GmbH. 396 Seiten. ISBN: 3-05-501400-6.

Fischer, Janine. 2011. *Theoretische Grundlagen zur Vorbereitung des F-Praktikumsversuchs: Solarzelle.* geänderte Version durch Kraner, Stefan am 12.10.2012, Technische Universität Dresden, Institut für Angewandte Photophysik. 27. Seiten.

Foitzik, Leonhard und Hinzpeter, Hans. 1958. *Sonnenstrahlung und Lufttrübung.* Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G. 309 Seiten.

Grundmann, Marius. 2006. *The Physics of Semiconductors, An Introduction Including Devices and Nanophysics.* Springer-Verlag Berlin-Heidelberg. 689 Seiten. ISBN: 3-540-25370-X.

Häckel, Hans. 1999. *Farbatlas Wetterphänomene.* Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart. 336 Seiten. ISBN: 978-3-800-13511-0.

Häckel, Hans. 2005. *Meteorologie.* 5. völlig überarbeitete Auflage. Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart. 447 Seiten. ISBN: 3-8252-1338-2.

Hupfer, Peter und Kuttler, Wilhelm. 2006. *Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie.* 12. überarbeitete Auflage. Wiesbaden, B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlag GmbH. 554 Seiten. ISBN: 3-8351-0096-3.

Kaltschmitt, Martin und Streicher, Wolfgang. 2005. Solare Strahlung. In: Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang und Wiese, Andreas (Hrsg.). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 3-540-28204-1. Seite 47-61.

Kaltschmitt, Martin; Sauer, Dirk Uwe; Rau, Uwe; Preiser, Klaus und Roth, Werner. 2005. *Systemtechnische Beschreibung.* In: Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang und Wiese, Andreas (Hrsg.). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 3-540-28204-1. Seite 206-257.

Kaltschmitt, Martin und Rau, Uwe. 2005. *Physikalische Grundlagen.* In: Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang und Wiese, Andreas (Hrsg.). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 3-540-28204-1. Seite 197-205.

Kamp, Martin. 2007. *Angewandte Halbleiterphysik.* Skript der Vorlesung für das Wintersemester 2006/2007. Universität Würzburg, Technische Physik. 148 Seiten.

Kraus, Helmut. 2004. *Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie.* 3. erweiterte und aktualisierte Auflage. Berlin, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 2004. 422 Seiten. ISBN: 3-540-20656-6.

Kuchling, Horst. 2010. *Taschenbuch der Physik.* 20. aktualisierte Auflage. Leipzig, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. 711 Seiten. ISBN: 978-3-446-42457-9.

Liljequist, H. und Cehak, Konrad. 2006. *Allgemeine Meteorologie.* 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Braunschweig, Wiesbaden, Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH. 396 Seiten. ISBN: 3-540-41565-3.

Lindner, Helmut. 1959. *Physik*. In: Birnbaum, Heinz; Schütze, Bruno; Städtler, Werner; Lindner, Helmut; Drath, Raimund; Haase, Paul; Estel, Ernst; Pohlenz, Werner; Boesler, Joh.; Stapf, Helmut; Nell, Walter und Sutaner, Hans. Das Grundwissen des Ingenieurs. Leipzig, Fachbuchverlag Leipzig. S. 171 - 236.

Mertens, Konrad. 2011. *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis.* München, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. 290 Seiten. ISBN: 978-3-446-42172-1.

Stapf, Helmut. 1959. *Chemie*. In: Birnbaum, Heinz; Schütze, Bruno; Städtler, Werner; Lindner, Helmut; Drath, Raimund; Haase, Paul; Estel, Ernst; Pohlenz, Werner; Boesler, Joh.; Stapf, Helmut; Nell, Walter und Sutaner, Hans. Das Grundwissen des Ingenieurs. Leipzig, Fachbuchverlag Leipzig. S. 565 - 698.

Sze, S.M. und Ng, Kwok K. 2007. *Physics of Semiconductor Devices.* Dritte Auflage. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. 815 Seiten. ISBN: 0-471-14323-5.

Wagemann, Hans-Günther und Eschrich, Heinz. 2010. *Photovoltaik: Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben.* 2. Überarbeitete Auflage. Wiesbaden, Vieweg + Teubner / GWV Fachverlage GmbH. 267 Seiten. ISBN: 978-3-8348-0637-6.

Wagner, Andreas. 2010. *Photovoltaik Engineering: Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung.* 3. Erweiterte Auflage. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 441 Seiten. ISBN: 978-3-642-05412-9.

Weiß, S.; Militzer, K.-E. und Gramlich, K. 1993. *Thermische Verfahrenstechnik.* Leipzig / Stuttgart, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. 636 Seiten.

Weißbach, Wolfgang. 1999. *Werkstoffkunde.* In: Böge, Alfred (Hrsg.). Das Techniker Handbuch: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 15. überarbeitete und erweiterte Auflage. Braunschweig, Wiesbaden, Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH. ISBN: 3-528-34053-3. Seite 463-596.

Wesselak, Viktor und Schabbach, Thomas. 2009. *Regenerative Energietechnik.* 1. Auflage. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag. 540 Seiten. ISBN: 978-3-540-95881-9.

Wesselak, Viktor; Schabbach, Thomas; Link, Thomas und Fischer, Joachim. 2013. *Regenerative Energietechnik.* 2. Auflage. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag. 862 Seiten. ISBN: 978-3-642-24164-2.

Kapitel 3

Abtew, T.A. und Drabold, D.A. 2006. *Light-induced structural changes in hydrogenated amorphous silicon.* Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Band 8, Nummer 6, Dezember 2006. Seite 1979-1988.

Bätzner, D.L.; Romeo, A.; Terheggen, M.; Döbeli, M.; Zogg, H. und Tiwari, A.N. 2004. *Stability aspects in CdTe/CdS solar cells.* Thin Solid Films, Band 451-452. Seite 536-543.

Becker, Frank-Michael; Boortz, Gunter; Dietrich, Volkmar; Engelmann, Lutz; Ernst, Christine; Fanghänel, Günter; Höhne, Heinz; Lenertat, Rudi; Liesenberg, Günter; Meyer, Lothar; Pews-Hocke, Christa; Schmidt, Gerd-Dietrich; Stamm, Reinhard und Weber, Karlheinz. 2000. *Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen I und II.* 8. überarbeitete Auflage. Berlin, Paetec Gesellschaft für Bildung und Technik mbH. 123 Seiten. ISBN: 3-89517-253-7.

Benagli, S.; Borrello, D.; Vallat-Sauvain, E.; Meier, J.; Kroll, U.; Hoetzel, J.; Bailat, J.; Steinhauser, J.; Marmelo, M.; Monteduro, G. und Castens, L. 2009. *High-Efficiency Amorphous Silicon Devices on LPCVD-ZnO TCO Prepared in Industrial KAI™-M R&D Reactor.* In Veröffentlichungen von: 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21.-25. September 2009. Seite 2293-2298.

Birkmire, Robert. 2010. *Thin-Film Solar Cells and Modules.* In: Fraas, Lewis und Partain, Larry. 2010. Solar Cells and their applications. Second edition. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN: 978-0-470-44633-1. Seite 137-158.

Bonnet, Dieter. 2012. *CdTe Thin-Film PV Modules.* In: McEvoy, A., Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2012. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. Second edition. Oxford, UK, Academic Press, Elsevier Ltd. 1244 Seiten, ISBN: 978-0-12-385934-1. Seite 283-322.

Burgelman, Marc. 2006. *Cadmium Telluride Thin Film Solar Cells: Characterization, Fabrication and Modeling.* In: Poortmans, Jef und Arkhipov, Vladimir. 2006. Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications. Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd, Wiley series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications. ISBN: 0-470-09126-6. Seite 277-324.

Carlson, D. E.; Wronski, C. R.; Triano, A. R. und Daniel, R. E. 1976. *Solar cells using Schottky barriers on amorphous silicon.* 12th Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge, Louisiana, USA, 15.-18. November 1976, Conference Record (A78-10902 01-44). New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Seite 893-895.

Clemminck, I.; Burgelman, M.; Casteleyn, M.; De Poorter, J. und Vervaet, A. 1991. *Interdiffusion of CdS and CdTe in screenprinted and sintered CdS-CdTe solar cells.* In Veröffentlichungen von: 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, Nevada, USA, 07.-11. Oktober 1991. Seite 1114-1119.

Collins, R.W. und Ferlauto, A.S. 2002. *Advances in plasma-enhanced chemical vapor deposition of silicon films at low temperatures.* Current Opinion in Solid State and Materials Science, Band 6, Heft 5, Oktober 2002. Seite 425-437.

Enderlein, Rolf und Schenk, Andreas. 1992. *Grundlagen der Halbleiterphysik*. Berlin, Akademie Verlag GmbH. 396 Seiten. ISBN: 3-05-501400-6.

Goetzberger, A. und Hoffmann, V.U. 2010. *Photovoltaic Solar Energy Generation.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, optical sciences. 232 Seiten. ISBN: 978-3-642-06260-5.

Green, Martin A. 2003. *High-Efficiency Silicon Solar Cell Concepts.* In: Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2003. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. New York, Elsevier Advanced Technology. ISBN: 978-1-85617-390-2. Seite 253-278.

Green, Martin A. 2012. *High-Efficiency Silicon Solar Cell Concepts.* In: McEvoy, A., Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2012. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. Second edition. Oxford, UK, Academic Press, Elsevier Ltd. 1244 Seiten, ISBN: 978-0-12-385934-1. Seite 99-128.

Green, Martin A.; Emery, Keith; Hishikawa, Yoshihiro; Warta, Wilhelmund Dunlop, Ewan D. 2013. *Solar cell efficiency tables (version 42).* Accelerated Publication, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Band 21, Heft 5, July 2013. Wiley Online Library. Seite 827-837.

Gross, A.; Vetterl, O.; Lambertz, A.; Finger, F.; Wagner, H. und Dasgupta A. 2001. *N-side illuminated microcrystalline silicon solar cells.* Applied Physics Letters, Band 79, Nummer 17, 22. Oktober 2001. Seite 2841-2843.

Grundmann, Marius. 2006. *The Physics of Semiconductors, An Introduction Including Devices and Nanophysics.* Springer-Verlag Berlin-Heidelberg. 689 Seiten. ISBN: 3-540-25370-X.

Guha, S.; Yang, J. und Banerjee, A. 2000. *Amorphous Silicon Alloy Photovoltaic Research – Present and Future.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Band 8, Heft 1, Januar/Februar 2000. Seite 141-150.

Gupta, Akhlesh; Parikh, Viral und Compaan, Alvin D. 2006. *High efficiency ultra-thin sputtered CdTe solar cells.* Solar Energy Materials & Solar Cells, Band 90, September 2006. Seite 2263-2271.

Hädrich, Mathias. 2009. *Materialwissenschaftliche Untersuchungen an CdTe-CdS-Heterosolarzellen.* Friedrich-Schiller-Universität Jena, Physikalisch-Astronomischen Fakultät, Dissertation, 30.06.2011. 111 Seiten.

Hanna, G.; Jasenek, A.; Rau, U. und Schock, H.W. 2000. *Open Circuit Voltage Limitations in $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ Thin-Film Solar Cells – Dependence on Alloy Composition.* physica status solidi (a), Band 179, Heft 1, Mai 2000. Seite R7-R8.

Henry, C. H. 1980. *Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells*. Journal of Applied Physics, Band 51, Heft 8. Seite 4494-4450. doi: 10.1063/1.328272.

Jahn, U.; Okamoto, T.; Yamada, A. und Konagai, M. 2001. *Doping and intermixing in CdS/CdTe solar cells fabricated under different conditions.* Journal of Applied Physics, Band 90, Heft 5, 01. September 2001. Seite 2553-2558.

Kaltschmitt, Martin; Sauer, Dirk Uwe; Rau, Uwe; Preiser, Klaus und Roth, Werner. 2005. *Systemtechnische Beschreibung.* In: Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang und Wiese, Andreas (Hrsg.). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 3-540-28204-1. Seite 206-257.

King, R.R. und Sinton, R.A. und Swanson, R.M. 1989. *Doped surfaces in one sun, point-contact solar cells.* Applied Physics Letters, Band 54, Heft 15, 10 April 1989. Seite 1460-1462.

Klenk, Reiner und Lux-Steiner, Martha Ch. 2006. *Chalcopyrite Based Solar Cells.* In: Poortmans, Jef und Arkhipov, Vladimir. 2006. Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications. Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd, Wiley series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications. ISBN: 0-470-09126-6. Seite 237-276.

Kraft, Christian. 2011. *Spektroskopische Untersuchungen zur Dotierung von polykristallinen CdTe-Schichten für Solarzellen.* Friedrich-Schiller-Universität Jena, Physikalisch-Astronomischen Fakultät, Dissertation, 29.11.2011. 117 Seiten.

Markvart, Tom. 2003. *Principles of Solar Cell Operation.* In: Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2003. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. New York, Elsevier Advanced Technology. ISBN: 978-1-85617-390-2. Seite 71-93.

McCandless, Brian E.; Engelmann, Michael G. und Birkmire, Robert W. 2001. *Interdiffusion of CdS/CdTe thin films: Modeling x-ray diffraction line profiles.* Journal of Applied Physics, Band 89, Heft 2, 15. Januar 2001. Seite 988-994.

Meier, J.; Flückiger, R.; Keppner, H. und Shah, A. 1994. *Complete microcrystalline pin solar cell - Crystalline or amorphous cell behavior?* Applied Physics Letters, Band 65, Heft 7, 1994. Seite 860-862.

Mertens, Konrad. 2011. *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis.* München, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. 290 Seiten. ISBN: 978-3-446-42172-1.

Mishima, Takahiro; Taguchi, Mikio; Sakata, Hitoshi und Maruyama, Eiji. 2011. *Development status of high-efficiency HIT solar cells.* Solar Energy Materials & Solar Cells, Band 95, Heft 1. Seite 18-21.

Naghavi, N.; Abou-Ras, D.; Allsop, N.; Barreau, N.; Bücheler, S.; Ennaoui, A.; Fischer, C.-H.; Guillen, C.; Hariskos, D.; Herrero, J.; Klenk, R.; Kushiya, K.; Lincot, D.; Menner, R.; Nakada, T.; Platzer-Björkman, C.; Spiering, S.; Tiwari, A.N. und Törndahl, T. 2010. *Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se)$_2$ based thin film photovoltaics: present status and current developments.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Band 18, Heft 6, Spezialausgabe: Chalcopyrite Thin Film Solar Cells, September 2010. Seite 411-433.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2013. Best Research-Cell Efficiencies. In: https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png, 03.03.2014.

Partain, Larry. 2010. *Solar cell device physics.* In: Fraas, Lewis und Partain, Larry. 2010. Solar Cells and their applications. Second edition. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN: 978-0-470-44633-1. Seite 67-109.

Powalla, M. und Dimmler, B. 2001. *Process development of high performance CIGS modules for mass production.* Thin Solid Films, Band 387. Seite 251-256.

Rau, U. und Schock, H.W. 2012. *Cu(In,Ga)Se$_2$ Thin-Film Solar Cells.* In: McEvoy, A., Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2012. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. Second edition. Oxford, UK, Academic Press, Elsevier Ltd. 1244 Seiten, ISBN: 978-0-12-385934-1. Seite 323-372.

Rau, Uwe und Schmidt, Marion. 2001. *Electronic properties of ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se$_2$ solar cells - aspects of heterojunction formation.* Thin Solid Films, Band 387. Seite 141-146.

Repmann, Tobias. 2003. *Stapelsolarzellen aus amorphem und mikrokristallinem Silizium: Prozess- und Modulentwicklung.* Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, Berichte des Forschungszentrums Jülich; 4082. 169 Seiten. ISSN: 0944-2952.

Rockett, Angus A. 2010. *Current status and opportunities in chalcopyrite solar cells.* Current Opinion in Solid State and Materials Science, Band 14, Heft 6, Dezember 2010. Seite 143-148.

Rubin, Leonid. 2010. *Crystalline silicon solar cells and modules.* In: Fraas, Lewis und Partain, Larry. 2010. Solar Cells and their applications. Second edition. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN: 978-0-470-44633-1. Seite 113-136.

Sander, Knut; Zangl, Stéphanie; Reichmuth, Matthias und Schröder, Gerd. 2004. *Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung.* Hamburg / Leipzig. Ökopol - Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg & IE – Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig. Umwelt-Forschungs-Plan, FKZ 202 33 304, Endbericht. 109 Seiten.

Shah. Arvind. 2012. *Thin-Film Silicon Solar Cells.* In: McEvoy, A., Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2012. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. Second edition. Oxford, UK, Academic Press, Elsevier Ltd. 1244 Seiten, ISBN: 978-0-12-385934-1. Seite 209-282.

Shimizu, Tatsuo. 2004. *Staebler-Wronski Effect in Hydrogenated Amorphous Silicon and Related Alloy Films.* Japanese Journal of Applied Physics, Band 43, Nummer 6A, 2004. Seite 3257–3268.

Singh, Udai P. und Patra, Surya P. 2010. *Progress in Polycrystalline Thin-Film Cu(In,Ga)Se$_2$ Solar Cells.* International Journal of Photoenergy, Band 2010, Article ID: 468147. 19 Seiten.

Sollmann, Dominik. 2009. *Was lange währt…* Photon, Forschung & Technik, Hochleistungszellen, Juli 2009. Seite 76-78.

Staebler, D.L. und Wronski, C.R. 1977. *Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si.* Applied Physics Letters, Band 31, Nummer 4, 15 August 1977. Seite 292-294.

Sze, S.M. und Ng, Kwok K. 2007. *Physics of Semiconductor Devices.* Dritte Auflage. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. 815 Seiten. ISBN: 0-471-14323-5.

Szlufcik, Jozef; Agostinelli, Guido; Duerinckx, Filip; Van Kerschaver , Emmanuel und Beaucarne, Guy. 2003. *Low Cost Industrial Technologies of Crystalline Silicon Solar Cells.* In: Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2003. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. New York, Elsevier Advanced Technology. ISBN: 978-1-85617-390-2. Seite 155-184.

Vepřek, S. und Mareček, V. 1968. *The preparation of thin layers of Ge ans Si by chemical hydrogen plasma Transport.* Solid-State Electronics, Pergamon Press, Band 11. Seite 683-684.

Verlinden, Pierre J. 2003. *High-Efficiency Concentrator Silicon Solar Cells*. In: Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2003. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. New York, Elsevier Advanced Technology. ISBN: 978-1-85617-390-2. Seite 435-455.

Witte, T.;Gahler, A. und Booth, H.J. 2010. *Next Generation of Laser Scribing Technology for Grid-Parity and Beyond.* In Veröffentlichungen von: 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 06.-10.September 2010. Seite 3213-3216.

Wronski, C.R. 1997. *The light induced changes in a-Si:H materials and solar cells - where we are now.* Materials Research Society, Band. 467, 1997. Seite 7-17.

Wu, X.; Asher, S.; Levi, D.H.; King, D.E.; Yan, Y.; Gessert, T.A. und Sheldon, P. 2001. *Interdiffusion of CdS and Zn_2SnO_4 layers and its application in CdS/CdTe polycrystalline thin-film solar cells.* Journal of Applied Physics, Band 89, Heft 8, 15. April 2001. Seite 4564-4569.

Yablonovitch, Eli und Cody, George D. 1982. *Intensity Enchancement in Textured Optical Sheets for Solar Cells.* IEEE Transactions on Electron Devices. Band 29, Heft 2, Februar 1982. Seite 300 – 305.

Yablonovitch, Eli. 1982. *Statistical ray optics.* Journal of the Optical Society of America, Band 72, Heft 7, Juli 1982. Seite 899 – 907.

Yan, Y.; Dhere, R.G.; Jones, K.M. und Al-Jassim, M.M. 2001. *Influence of substrate structure on the growth of CdTe thin films.* Journal of Applied Physics, Band 89, Heft 11, 01. Juni 2001. Seite 5944-5948.

Yang, J.; Banerjee, A. und Guha, S. 1997. *Triple-junction amorphous silicon alloy solar cell with 14.6% initial and 13.0% stable conversion efficiencies.* Applied Physics Letters, Band 70, Heft 22, 02. Juni 1997. Seite 2975-2977.

Zechner, Christoph. 1999. *Mechanisch texturierte Solarzellen und Rückkontakt-Solarzellen aus kristallinem Silizium.* Universität Konstanz, Fakultät für Physik, Dissertation. Dezember 1999. 145 Seiten.

Zeman, Miro. 2006. *Advanced Amorphous Silicon Solar Cell Technologies.* In: Poortmans, Jef und Arkhipov, Vladimir. 2006. Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications. Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd, Wiley series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications. ISBN: 0-470-09126-6. Seite 173-236.

Kapitel 4

Agentur für erneuerbare Energien (AEE). 2014. *Datenblatt: Solar.* In: http://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/D/kategorie/solar, Agentur für erneuerbare Energien, föderal erneuerbar, Bundesländer mit neuer Energie. abgerufen: Mai 2014.

Alsema, Erik A. und de Wild-Scholten, Mariska J. 2006. *Environmental Impacts of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production.* 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Leuven, 31.05.-02.06.2006. 6 Seiten.

Ammon, Martin; Olbrecht, Thomas und Twrsnick, Melanie. 2012. *German PV Market Briefing - Experten im Gespräch: Interviews und Markteinschätzungen.* Bonn, EuPD Research. 27 Seiten.

Ammon, Martin; Quack, Daniel; Krehan, David; Kleinschmidt, Linda und Schmickler, Priska. 2013. *Auswirkungen der Energiewende auf Ostdeutschland.* Bonn, EuPD Research und DCTI Deutsches CleanTech Institut, Endbericht. 28.08.2013. 152 Seiten.

Angerer, Gerhard; Erdmann, Lorenz; Marscheider-Weidemann, Frank; Scharp, Michael; Lüllmann, Arne; Handke, Volker und Marwede, Max. 2009. *Rohstoffe für Zukunftstechnologien - Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage.* Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag. 404 Seiten. ISBN: 978-3-8167-7957-5.

Antal, Monika; Concas, Giorgia; Despotou, Eleni; El Gammal, Adel; Montoro, Daniel Fraile; Latour, Marie; Llamas, Paula; Lenoir, Sophie; Masson, Gaëtan; Vanbuggenhout, Pieterjan; Teske, Sven; Rolland, Simon und Short, Rebecca. 2011. *Solar Generation 6: Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World.* Brüssel, European Photovoltaic Industry Association (EPIA a.i.s.b.l.). 100 Seiten.

Babies, Hans-Georg; Buchholz, Peter; Homberg-Heumann, Doris; Huy, Dieter; Meßner, Jürgen; Neumann, Wolfgang; Röhling, Simone; Schauer, Michael; Schmidt, Sandro; Schmitz, Martin und Wilken, Hildegard. 2011. *Deutschland – Rohstoffsituation 2010.* Hannover, Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Dezember 2011. 176 Seiten. ISBN: 978-3-943566-00-0.

Bartels, Frank. 2012. *Eskimos kennen mehr als 100 Wörter für Schnee.* Gabler Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden. 213 Seiten. ISBN: 978-3-8349-3914-2.

Barthelmy, David. o.J. *Mineral Species containing Silicon (Si).* In: http://webmineral.com/chem/Chem-Si.shtml, abgerufen: 27.02.2014.

Bathey, B.R. und Cretella, M. C. 1982. *Solar-grade silicon.* Journal of Materials Sciences, Band 17. Seite: 3077-3096.

Bechnik, Bronislav. 2010. *What's Happening in the Czech PV Industry?: Updates on PV policies and programs.* In: http://www.interpv.net/market/market_view .asp?idx=293&part_code=02&page=9, abgerufen: 10.06.2014.

Becker, Frank-Michael; Boortz, Gunter; Dietrich, Volkmar; Engelmann, Lutz; Ernst, Christine; Fanghänel, Günter; Höhne, Heinz; Lenertat, Rudi; Liesenberg, Günter; Meyer, Lothar; Pews-Hocke, Christa; Schmidt, Gerd-Dietrich; Stamm, Reinhard und Weber, Karlheinz. 2000. *Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen I und II.* 8. überarbeitete Auflage. Berlin, Paetec Gesellschaft für Bildung und Technik mbH. 123 Seiten. ISBN: 3-89517-253-7.

Beckmann, Jürgen. 2013. *Photovoltaik in Deutschland: Konsequenzen für das Recycling.* Wien, Round Table „Recycling von PV-Modulen", 06. November 2013. Green jobs Austria. 19 Seiten.

Behrendt, Siegfried; Erdmann, Lorenz; Marwede, Max und Caporal, Sophie. 2010. *Roadmap: Ressourceneffiziente Photovoltaik 2020+*. Wuppertal, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Ressourceneffizienz Paper 9.1, Arbeitspaket 9 des Projekts: Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRess). 152 Seiten.

bifa Umweltinstitut. 2014. *Materialeffizienz und versorgungskritische Materialien in der produzierenden Wirtschaft Bayerns.* Augsburg, bifa Umweltinstitut GmbH, März 2014. 48 Seiten.

Binder, Manuel. 2013. *Round Table „Recycling von PV-Modulen*". Wien, Green jobs Austria, 06. November 2013. Tagungsband. 18 Seiten.

Buchholz, Peter; Huy, Dieter; Liedtke, Maren und Schmidt, Michael. 2014. *DERA-Rohstoffliste 2014: Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Preis- und Lieferrisiken.* Berlin, Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). DERA Rohstoffinformationen, 24. August 2014. 114 Seiten. ISBN: 978-3-943566-17-8.

Bundesamt für Forschung und Technologie (BMFT). 1990. *Richtlinie zur Förderung und Erprobung kleiner photovoltaischer Solarenergieanlagen (Bund-Länder-1000-Dächer-Photovoltaik-Programm) vom 18.09.1990.* veröffentlicht im Bundesanzeiger Jahrgang 42, Nr. 179, 22.09.1990. Seite 4997.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). 2012. *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess): Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen – Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.2.2012.* Berlin, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stand: 14.05.2012, Version 4.0.8. 121 Seiten.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). 2014a. *Eckpunkte für die Reform des EEG.* Berlin, BMWi, 21. Januar 2014. 13 Seiten.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). 2014b. *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. Stand: Februar 2014. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik. 35 Seiten.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BWMi). 2010. *Rohstoffstrategie der Bundesregierung: Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen.* Berlin, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BWMi), Oktober 2010. 27 Seiten.

Bundesnetzagentur (BNA). 2014. *Archivierte Datenmeldungen.* In: http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1421/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/ArchivDatenMeldgn/ArchivDatenMeldgn_node.html#doc405800bodyText1, Abgerufen: 02.05.2014.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW). 2014. *Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2014). Anlagen, installierte Leistung, Stromerzeugung, EEG - Auszahlungen, Marktintegration der Erneuerbaren Energien und regionale Verteilung der EEG-induzierten Zahlungsströme.* Berlin, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 24.02.2014. 95 Seiten.

Bundesverband Solarwirtschaft (BSW-Solar). 2014a. *Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik).* Bundesverband Solarwirtschaft e.V., April 2014. 4 Seiten.

Bundesverband Solarwirtschaft (BSW-Solar). 2014b. *Entwicklung des deutschen PV-Marktes, Auswertung und graphische Darstellung der Meldedaten der Bundesnetzagentur nach § 16 (2) EEG 2009 – Stand 31.03.2014.* Bundesverband Solarwirtschaft e.V., Februar 2014. 16 Seiten.

Bunner, Christopher. 2010. *Terrestrial Module Fabrication and Assembly Technologies*. In: Fraas, Lewis und Partain, Larry. 2010. Solar Cells and their applications. Second edition. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN: 978-0-470-44633-1. Seite 159-170.

Ceccaroli, Bruno und Lohne, Otto. 2003. *Solar Grade Silicon Feedstock.* In: Luque, Antonio und Hegedus, Steven S. (Ed.). 2003. Handbook of photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons Ltd. 1168 Seiten. ISBN: 0-471-49196-9. Seite 153-204.

Chapin, D. M., Fuller, C. S. und Pearson, G. L. 1954. *A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power.* Journal of Applied Physics, Band 25, Heft 5, Seite 676-677.

Choi, Jun-Ki und Fthenakis, Vasilis. 2010. *Design and Optimization of Photovoltaics Recycling Infrastructure.* Environmental Science & Technology, Band 44, Heft 22, 15. November 2010. Seite 8678-8683.

Claudy, Peter; Gerdes, Michaela und Ondraczek, Janosch. 2010. *Die deutsche Photovoltaik-Branche am Scheideweg: Herausforderungen und Chancen für Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette.* PricewaterhouseCoopers AG, Oktober 2010. 112 Seiten.

Coletti, Gianluca. 2011. *Impurities in silicon and their impact on solar cell performance.* Universität Utrecht, Dissertation, 19. September 2011. 122 Seiten.

De Moor, Hugo; Hagemann, Ingo; Herrero, Jose; Malbranche, Philippe; Siebentritt, Susanne; Schedel-Niedrig, Thomas; Riedle, Tomas; Poortmans, Jef; Nijs, Johan; Szlufcik, Jozef; Jäger-Waldau, Arnulf; Karg, Franz; Özsan, Ersin; Pietruszko, Stanislaw; Haywood, Stephanie; Topic, Marko; Schropp, Ruud; Rath, J.; Löffler, Jochen; Dimmler, Bernhard; Powalla, Michael und Springer, Johann. 2004. *PVNET: European Roadmap for PV R&D.* Luxembourg, Office of Official Publications of the European Communities. Contract Reference: ENK6-CT2001-20400. 53 Seiten. ISBN: 92-894-7349-5.

de Wild-Scholten, Mariska J. und Alsema, Erik A. 2007. *Environmental Life Cycle Inventory of Crystalline Silicon Photovoltaic System Production: status 2005/2006.* März 2007. Exceldatei. In: http://www.ecn.nl/docs/library/report/2006/c06002-LCI_data-cSiPV-pub-v1.xls, abgerufen: 23. Oktober 2014.

Demin, Anton. 2012. *Reaktionstechnische Untersuchungen zur Hydrochlorierung von metallurgischem Silicium.* Universität Stuttgart, Institut für Technische Chemie, Dissertation, 27.03.2012. 179 Seiten.

Department of Energy & Climate Change (DECC). 2013. *UK Solar PV Strategy Part 1: Roadmap to a Brighter Future.* London, DECC, Oktober 2013. 38 Seiten.

Diodes Incorporated. 2014. *Datenblatt Diodentyp: SBR12U45LH*. Produktdatenblatt, Stand: Februar 2014, Dokumentennummer: DS35094 Rev. 6 – 2. 5 Seiten.

ecoinvent. o.J. *Database v.3.01*. In: www.ecoinvent.org, abgerufen: Jahr 2014.

EL-Beyrouty, Kareen; Meimanaliev, Adilet-Sultan; Petrosyan, Lilit und Singh Diva. 2009. *Germany's Photovoltaic Cluster.* Cambridge, Massachusetts, Harvard University, PED-329, Microeconomics of Competitiveness: Firms, Clusters and Economic Development, Mai 2009. 32 Seiten.

ENF Ltd. 2014. *Solar Cell Directory.* In: https://www.enfsolar.com/pv/cell, abgerufen: 10.12.2014.

ENF Ltd. 2015. *PV Industry Data – Solar Worldmap.* In: http://www.enfsolar.com/map/all, abgerufen: 12.06.2015.

Enkhardt, Sandra. 2014. *IHS erwartet Ende des Preisverfalls bei Solarglas.* In: http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/ihs-erwartet-ende-des-preisverfalls-bei-solarglas_100017064/, abgerufen: 07.05.2015.

Enkhardt, Sandra. 2014. *90 Prozent aller Solarmodule werden in Asien produziert.* In: http://www.pv-magazine.de/index.php?id=9&tx_ttnews%5btt_news%5d=15288&noMobile=1&cHash=80f0653ae3c526cfafe65c2aa643a8b2, abgerufen: 05.06.2015.

Enkhardt, Sandra. 2015. *Hanwha Q-Cells hat Produktion in Deutschland beendet.* In: http://www.pv-magazine.de/index.php?id=9&tx_ttnews%5Btt_news%5D=18284&noMobile=1&cHash=e4b840aedc042e8e29249b4079c0c7af, abgerufen: 01.06.2015.

Erdmann, Lorenz; Behrendt, Siegfried und Feil, Moira. 2011. *Kritische Rohstoffe für Deutschland - Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte.* Berlin, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), adelphi. September 2011. 172 Seiten.

EurObserv'ER. 2013. *Photovoltaic Barometer 2013.* Observ'er. April 2013. 24 Seiten.

EurObserv'ER. 2014. *Geographic Information System.* In: http://observer.cartajour-online.com/Interface_Standard/cart@jour.phtml?NOM_PROJET=barosig&NOM_USER=&Langue=Langue2&Login=OK&Pass=OK, abgerufen: 10.06.2014.

Europäische Kommission. 2014. *Report on Critical Raw Materials for the EU – Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials.* In: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf, abgerufen: 03. Juni 2014. 41 Seiten.

European Photovoltaic Industry Association (EPIA). 2014. *Market Report 2013.* Brüssel, EPIA, März 2014. 6 Seiten.

Fishman, Oleg S. 2008. *Solar Silicon. Part 1.* advanced materials & processes, September 2008. Seite 39-40.

Forstner, Hali; Bandil, Sandeep; Zwegers, Martijn; Bollen, Roel; Coletti, Gianluca, Sinke, Wim; Bultman, Jan; Wyers, Paul; Wertz, Roland; Wu, Stone; Lin, KC; Metz, Axel; Meixner, Moritz; Fischer, Markus; Spiess, Thomas; Mette, Michael; Mette, Ansgar; Petter, Kai; Gerlach, Alexander; Engelhart, Peter; Xing, Guoqiang; Demenik, Andrey; McMullen, David; Mohr, Carsten; Stassen, Arno; Slufcik, Jozef; Yong, Liu; Kaufmann, Stefan; Wan, Yuepeng; Wang, Yingge; Liu, Sophie; Richter, André; Pai, Richard; Wang, Kirin; Chen, Bob; Luan, Andy; Buchovskaja, Iryna; Spill, Burkhard; Pingel, Roger; Ramakrishnan, Arun; Julsrud, Stein; Osborne, Wayne; Flores, Archie; Fath, Peter; Nussbaumer, Hartmut; Raithel, Stephan; Pingel, Sebastian; Frank, Oliver; Zhu, Jim; Ristow, Alan; Oberbeck, Lars und Demenik, Grigory. 2014. *International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV): 2013 Results.* Brüssel, SEMI Europe. ITRPV, Fifth Edition, Revision 1. 24. März 2014. 37 Seiten.

Four Peaks Technologies. 2014. *Solar Markets.* In: http://solarcellcentral.com/markets_page.html#tf_mkt_share, 25.08.2014.

Fraas, Lewis und Partain, Larry. 2010. *Solar Cells: A brief history and introduction.* In: Fraas, Lewis und Partain, Larry. 2010. Solar Cells and their applications. Second edition. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN: 978-0-470-44633-1. Seite 3-16.

Franke, Petra. 2014. *Klein, aber fein.* Photovoltaic, Heft 06/2014. Seite 40-45.

Frischknecht, R.; Jungbluth, N.; Althaus, H.-J.; Doka, G.; Heck, T.; Hellweg, S.; Hischier, R.; Nemecek, T.; Rebitzer, G.; Spielmann, M. und Wernet, G. 2007. *Overview and Methodology.* ecoinvent report No. 1. Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dezember 2007. 77 Seiten.

Fthenakis, Vasilis M. 2012. *Overview of Potential Hazards.* In: McEvoy, A., Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2012. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. Second edition. Oxford, UK, Academic Press, Elsevier Ltd. 1244 Seiten, ISBN: 978-0-12-385934-1. Seite 1083-1096.

Germany Trade & Invest. 2014. *Photovoltaics - made in Germany.* Berlin, Germany Trade & Invest GmbH, Mai 2014. 2 Seiten.

Ginley, David; Green, Martin A. und Collins, Reuben. 2008. *Solar Energy Conversion Toward 1 Terawatt.* MRS Bulletin, Band 33, Seite 355-364.

Goetzberger, A. und Hoffmann, V.U. 2010. *Photovoltaic Solar Energy Generation.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, optical sciences. 232 Seiten. ISBN: 978-3-642-06260-5.

Goodrich, Alan; Hacke, Peter; Wang, Qi; Sopori, Bhushan; Margolis, Robert; James, Ted L. und Woodhouse, Michael. 2013. *A wafer-based monocrystalline silicon photovoltaics road map: Utilizing known technology improvement opportunities for further reductions in manufacturing costs.* Solar Energy Materials & Solar Cells Band 114, Juli 2013. Seite 110-135.

Haas, Hans-Dieter und Schlesinger, Dieter Matthew. 2007. *Umweltökonomie und Ressourcenmanagement.* Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft (WBG). 160 Seiten. ISBN: 978-3-534-20029-0.

Hahn, G. 2010. *Status of Selective Emitter Technology.* In Veröffentlichungen von: 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6.-10. September 2010. Seite 1091–1096.

Hauff, Jochen; Verdonck, Marnik; Derveaux, Harold; Dumarest, Laurent; Alberich, Jose; Malherbe, Jean-Charles; Gammal, Adel El; Llamas, Paula; Masson, Gaëtan und Macías, Ernesto. 2010. *Unlocking the Sunbelt Potential of Photovoltaics.* 2. Edition. Brüssel, European Photovoltaic Industry Association (EPIA), Oktober 2010. 56 Seiten.

Hegedus, Steven S. und Luque, Antonio. 2003. *Status, Trends, Challenges and the Bright Future of Solar Electricity from Photovoltaics.* In: Luque, Antonio und Hegedus, Steven S. (Ed.). 2003. Handbook of photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons Ltd. 1168 Seiten. ISBN: 0-471-49196-9. Seite 1-43.

Hering, Garrett. 2011. *Das Jahr des Tigers.* Photon, Heft 4/2011, April 2011, Seite 38-71.

Hermann, W.; Adrian, M. und Wiesner, W. 1998. *Operational behaviour of commercial solar cells under reverse biased conditions.* In Veröffentlichungen von: 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion. Wien, 06.-10. Juli 1998. Seite 2357-2359.

Huy, Dieter; Andruleit, Harald; Babies, Hans-Georg; Elsner, Harald; Homberg-Heumann, Doris; Meßner, Jürgen; Röhling, Simone; Schauer, Michael; Schmidt, Sandro; Schmitz, Martin und Szurlies, Michael. 2014. *Deutschland – Rohstoffsituation 2013.* Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), November 2014. 162 Seiten. ISBN: 978-3-943566-14-7.

IHS Inc. 2014. *Solar Glass Price Plunge to Cease as Trade Sanctions Take Effect.* In: http://press.ihs.com/press-release/design-supply-chain/solar-glass-price-plunge-cease-trade-sanctions-take-effect, abgerufen: 07.05.2015.

International Energy Agency (IEA). 2013. *Trends 2013 in Photovoltaic Applications*. Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2012. 18. Edition. Photovoltaic Power System Programme (PVPS). Report IEA-PVPS T1-23:2013. 80 Seiten. ISBN: 978-3-906042-14-5.

International Energy Agency (IEA). 2014. *A Snapshot of Global PV 1992-2013*. PVPS Report, 2. Edition. Report IEA-PVPS T1-24:2014. 16 Seiten. ISBN: 978-3-906042-19-0.

Jäger-Waldau, Arnulf. 2012. *The Photovoltaic Industry.* In: McEvoy, A., Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2012. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. Second edition. Oxford, UK, Academic Press, Elsevier Ltd. 1244 Seiten, ISBN: 978-0-12-385934-1. Seite 1153-1172.

Jungbluth, N. und Stucki, M. und Frischknecht, R. 2009. *Photovoltaics*. In: Dones, R. (Ed.). 2009. Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Dübendorf, CH, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. ecoinvent report No. 6-XII. 171 Seiten.

Jungbluth, Niels; Stucki, Matthias; Flury, Karin; Frischknecht, Rolf und Büsser, Sybille. 2012. *Life Cycle Inventories of Photovoltaics.* Uster, Schweiz, ESU-services Ltd. Report, Version: 2012. 238 Seiten.

Kaltschmitt, Martin; Müller, Markus und Schneider, Sven. 2005a. *Ökonomische und ökologische Analyse.* In: Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang und Wiese, Andreas (Hrsg.). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 3-540-28204-1. Seite 258-269.

Kaltschmitt, Martin; Sauer, Dirk Uwe; Rau, Uwe; Preiser, Klaus und Roth, Werner. 2005b. *Systemtechnische Beschreibung.* In: Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang und Wiese, Andreas (Hrsg.). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 3-540-28204-1. Seite 206-257.

Knoll, Beate und Siemer, Jochen. 2014. *Die verschwundene Hälfte.* Photon, Heft 3/2014, März 2014. Seite 18-21.

Koch, W.; Endrös, A. L.; Franke, D.; Häßler, C.; Kalejs, J. P. und Möller, H. J. 2003. *Bulk Crystal Groth and Wafering for PV.* In: Luque, Antonio und Hegedus, Steven S. (Ed.). 2003. Handbook of photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons Ltd. 1168 Seiten. ISBN: 0-471-49196-9. Seite 205-254.

Komatsu, Yuji; Galbiati, Giuseppe; Lamers, Machteld; Venema, Peter; Harris, Malcolm; Stassen, Arno F.; Meyer, Christine; van den Donker, Menno und Weeber, Arthur. 2009. *Innovative Diffusion Processes for improved Efficiency on Industrial Solar Cells by Doping Profile Manipulation.* In Veröffentlichungen von: 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, 21.-25. September 2009. Seite 1063–1067.

Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW). 2003. *100.000 Dächer-Solarstrom-Programm.* Programm-Nr. 127: Kredite für Photovoltaik-Anlagen in Deutschland, KfW, Januar 2003. 3 Seiten.

Kübler, Knut. 2013. *EEG-Förderung der Photovoltaik: Über den Anfang nach dem Ende.* Energiewirtschaftliche Tagesfragen 63. Jg. (2013), Heft 9, Seite 27-31.

Liaw, Ming H. 1990. *Crystal Growth of Silicon.* In: O'Mara, William C.; Herring, Robert B. und Hunt, Lee P. 1990. Handbook of semiconductor silicon technology. New Jersey, USA, Noyes Publications, 788 Seiten. ISBN: 0-8155-1237-6. Seite 94-191.

Masson, Gaëtan; Latour, Marie; Rekinger, Manoël; Theologitis, Ioannis-Thomas und Papoutsi, Myrto. 2013. *Global market outlook for Photovoltaics 2013-2017*. Brüssel, European Photovoltaic Industry Association (EPIA), 2013. 60 Seiten.

McKetta, John J. und Dekker, Marcel. (Ed). 1993. *Chemical processing handbook*. New York, CRC Press, 1993, 972 Seiten.

Mehta, Shyam. 2014. *Global 2013 PV Module Production Hits 39.8GW; Yingli is the Shipment Leader*. In: http://www.greentechmedia.com/articles/read/Global-2013-PV-Module-Production-Hits-39.8-GW-Yingli-Leads-in-Production-a, abgerufen: 05.06.2015.

Mertens, Konrad. 2011. *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis.* München, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. 290 Seiten. ISBN: 978-3-446-42172-1.

MicroChemicals GmbH. 2012. *Silizium Wafer.* In: http://www.microchemicals.com/fileadmin/user_upload/silicon_wafers.pdf, abgerufen: 14.08.2013.

Myhre, Gunnar; Shindell, Drew; Bréon, François-Marie; Collins, William; Fuglestvedt, Jan; Huang, Jianping; Koch, Dorothy; Lamarque, Jean-François; Lee, David; Mendoza, Blanca; Nalajima, Teruyuki; Robock, Alan; Stephens, Graeme; Takemura, Toshihiko und Zhang, Hua. 2013. *Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing.* In: Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.). 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: the physical science basis, Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment, 30. September 2013. Seite 8-1 bis 8-139.

Nagel, Henning. 2002. *Analyse und Reduktion der optischen und elektrischen Verluste in multikristallinen Silizium-Solarzellen.* Universität Hannover, Dissertation, 2002. 271 Seiten.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2014. Best Research-Cell Efficiencies. In: https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png, 04.09.2014.

Neidlein, Hans-Christoph. 2014. *Cells could run low*. pv magazine, Heft 05/2014. Seite 38-43.

Neuhaus, Holger. 2014. *Progress in High-Volume Solar Cell and Module Manufacturing Technologies.* Intersolar Europe 2014, ICM München, 02.06.2014 - 04.06.2014. SolarWorld Innovations GmbH. 24 Seiten.

Nitsch, Joachim; Pregger, Thomas; Naegler, Tobias; Heide, Dominik; de Tena, Diego Luca; Trieb, Franz; Scholz, Yvonne; Nienhaus, Kristina; Gerhardt, Norman; Sterner, Michael; Trost, Tobias; von Oehsen, Amany; Schwinn, Rainer; Pape, Carsten; Hahn, Henning; Wickert, Manuel und Wenzel, Bernd. 2012. *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global.* Arbeitsgemeinschaft: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel und Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Teltow. Schlussbericht BMU - FKZ 03MAP146. 29.März 2012. 345 Seiten.

Odden, J. O., Halvorsen, G., Rong, H. und Gløckner, R. 2008. *Comparison of the energy consumption in different production processes for solar grade silicon.* In: Øye, Harald A. 2008. Silicon for the Chemical and Solar Industry IX. Oslo, Norway. 16 Seiten.

Podewils, Christoph. 2013. *It's all over.* Photon International, Heft 1/2013. Seite 42-49.

Proteus Solutions GbR. 2014. *PV-Statistik: installierte Anlagenleistung.* In: https://www.proteus-solutions.de/~Photovoltaik/PV-Statistik:tM.F06!sM.PV06. asp, abgerufen: 30.04.2014.

PV Magazin. 2014. *Polysilizium-Zölle: Wacker und OCI sind Gewinner.* In: http://www.pv-magazine.de/index.php?id=9&tx_ttnews%5Btt_news%5D=13918&noMobile=1&cHash=30220bae17b3dc57d277b1e40c660a62, abgerufen: 07.05.2015.

Rahman, Mohammad Ziaur. 2012. *Status of Selective Emitters for p-Type c-Si Solar Cells.* Optics and Photonics Journal, Band 2, Nummer 2, 2. Juni 2012. Seite 129-134.

Reil, Florian. 2014. *New Quality Requirements for European and Export Applications.* Intersolar Europe 2014, ICM München, 02.06.2014 – 04.06.2014. Köln, TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH. 39 Seiten.

Rentsch, Jochen. 2005. *Trockentechnologien zur Herstellung von kristallinen Siliziumsolarzellen.* Universität Freiburg, Dissertation, April 2005. 253 Seiten.

Rindelhardt, U., Teichmann, G. und Lang, D. 1995. *Projektabwicklung und Ergebnisse des Bund-Länder-1000-Dächer-Photovoltaik-Programmes in Sachsen.* Dresden, Forschungszentrum Rossendorf e.V., September 1995. FZR-109. 91 Seiten.

Ritter, Jan. Hanwha Q Cells GmbH. 2014. *Persönliche Mitteilung,* 11.02.2014, Bitterfeld-Wolfen OT Thalheim.

Rothacher, Tobias. 2010. *Development of the PV cluster in Germany.* Berlin, Germany Trade & Invest, März 2010. 25 Folien.

Rothe, Stephan. 2014. Erneuerbare Energien - Handel und Distribution GmbH (EEHD). *Telefonische Mitteilung,* 08.08.2014, Leipzig.

Rubin, Leonid. 2010. *Crystalline silicon solar cells and modules.* In: Fraas, Lewis und Partain, Larry. 2010. Solar Cells and their applications. Second edition. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN: 978-0-470-44633-1. Seite 113-136.

Ruhl, Volker; Lütter, Florian; Schmidt, Christian; Wackerbauer, Johann und Triebswetter, Ursula. 2008. *Standortgutachten Photovoltaik in Deutschland – Kurzfassung.* Bonn, München, EuPD Research und Institut für Wirtschaftsforschung (ifo), März 2008. 28 Seiten.

Safarin, Jafar; Tranell, Gabriella und Tangstad, Merete. 2012. *Processes for upgrading metallurgical grade silicon to solar grade silicon.* Energy Procedia, Band 20. Seite 88-97.

Sander, Knut; Schilling, Stephanie; Wambach, Kartsen; Schlenker, Sylke; Müller, Anja; Springer, Johann; Fouquet, Dörte; Jelitte, Andrea; Stryi-Hipp, Gerhard und Chrometzka, Thomas. 2007. *Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystem für photovoltaische Produkte.* Hamburg, Ökopol GmbH, November 2007. Gefördert durch das BMU: Förderkennzeichen 03MAP092. 199 Seiten.

Sander, Knut; Zangl, Stéphanie; Reichmuth, Matthias und Schröder, Gerd. 2004. *Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung.* Hamburg / Leipzig. Ökopol - Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg & IE – Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig. Umwelt-Forschungs-Plan, FKZ 202 33 304, Endbericht. 109 Seiten.

Sarti, Dominique und Einhaus, Roland. 2002. *Silicon feedstock for the multi-crystalline photovoltaic industry.* Solar Energy Materials and Solar Cells, Band 72, Heft 1-4, April 2002. Seite 27-40.

Scheuplein, Christoph. 2002. *Identifizierung und Analyse von Produktionsclustern – Das Beispiel der Filmwirtschaft in Potsdam-Babelsberg*. Raumforschung und Raumordnung, 60. Jahrgang, Nummer 2, März 2002. Seite 123-135.

Shahan, Zachary. 2013. *US Solar To Hit Grid Parity 2014–2017 (+ More Solar PV Charts, Sort Of…).* In: http://cleantechnica.com/files/2013/06/thin-folm-solar-market-share-2020.png, abgerufen: 19.08.2014.

Sieg, Mirco und Enkhardt Sandra. 2015. *Intersolar Europe: Sigmar Gabriel verspricht Besserung für Solarbranche.* In: http://www.pv-magazine.de/index.php?id=9&tx_ttnews%5Btt_news%5D=19557&noMobile=1&cHash=d2d9bf060d5b1b1cd37026d3f0c53d58, abgerufen: 16. Juni 2015.

Sieg, Mirco. 2014. *Photovoltaik entwickelt sich 2014 zum Angebotsmarkt.* In: http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/photovoltaik-entwickelt-sich-2014-zum-angebotsmarkt_100014397/, 20.08.2014.

SolarServer. 2013. *Photovoltaik-Produktion in der CIGSfab: Integrierte Fabriken sorgen für wettbewerbsfähigen Solarstrom.* In: http://www.solarserver.de/solar-magazin/anlage-des-monats/photovoltaik-produktion-in-der-cigsfab-integrierte-fabriken-sorgen-fuer-wettbewerbsfaehigen-solarstrom.html, abgerufen: 01.09.2014.

Szlufcik, J.; Sivoththaman, S.; Nijs, J.; Mertens, R.P. und Van Overstraeten, R. 2012. *Low-Cost Industrial Technologies for Crystalline Silicon Solar Cells.* In: McEvoy, A., Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2012. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. Second edition. Oxford, UK, Academic Press, Elsevier Ltd. 1244 Seiten, ISBN: 978-0-12-385934-1. Seite 129-160.

Tobías, Ignacio; del Cañizo, Carlos und Alonso, Jesús. 2003. *Crystalline Silicon Solar Cells and Modules.* In: Luque, Antonio und Hegedus, Steven S. (Ed.). 2003. Handbook of photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons Ltd. 1168 Seiten. ISBN: 0-471-49196-9. S. 255-306.

TÜV Rheinland. 2009. *Bauartzertifizierung von PV-Modulen entsprechend IEC 61215:2005 bzw. IEC 61646:2008.* Köln, TÜV Rheinland Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH, Geschäftsfeld Regenerative Energien, Oktober 2009. Version 2009-10-13. 5 Seiten.

TÜV Rheinland. 2010. *Bauartzertifizierung von PV-Modulen entsprechend IEC 61215:2005 bzw. IEC 61646:2008.* Köln, TÜV Rheinland Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH, Geschäftsfeld Regenerative Energien, Oktober 2010. 6 Seiten.

Ullrich, Sven. 2014. *Kaum Rohstoffengpässe für Photovoltaikherstellung.* In: http://www.photovoltaik.eu/Kaum-Rohstoffengpaesse-fuer-Photovoltaikherstellung,QUlEPTU5NDk3OCZNSUQ9MzAwMjE.html, abgerufen: 07.05.2015.

Wacker Chemie AG. 2014. *Nach gutem 3. Quartal erwartet Wacker das Ebitda im Gesamtjahr 2014 bei einer Milliarde Euro.* München, Wacker Chemie AG. Presseinformation Nummer 54, Oktober 2014. 13 Seiten.

Wagemann, Hans-Günther und Eschrich, Heinz. 2010. *Photovoltaik: Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben.* 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden, Vieweg + Teubner / GWV Fachverlage GmbH. 267 Seiten. ISBN: 978-3-8348-0637-6.

Wagemann, Hans-Günther. 2014. *Unterlagen zur Vorlesung Solarenergie.* TU Berlin, Fakultät Elektrotechnik und Informatik, Hochfrequenz- & Halbleiter-Systemtechnologien, Fachgebiet Halbleiterbauelemente. In: http://www.lti.kit.edu/rd_download/Solarenergie_20081104_Kristalline_pn_Zellen.pdf, abgerufen: 28.02.2014

Wagner, Jörg; Heidrich, Kerstin; Baumann, Janett; Kügler, Thomas und Reichenbach, Jan. 2012. *Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie des Anteils des Recyclings an der Wertschöpfung unter Darstellung der Verwertungs- und Beseitigungspfade des ressourcenrelevanten Abfallaufkommens.* Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt (UBA), Mai 2012. Forschungskennzahl: 3709 33 316. 222 Seiten. ISSN: 1862-4804.

Wambach, Karsten. 2013. *Status und Zukunftsperspektiven des Recyclings von PV-Modulen.* Wien, Round Table „Recycling von PV-Modulen“, 06. November 2013. Green jobs Austria. 25 Seiten.

Weber, Eicke. 2014. *Trends and perspectives for global PV solar cell and module gigawatt-scale manufacturing.* Intersolar Europe 2014, ICM München, 02.06.2014 – 04.06.2014. Freiburg, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE). 22 Seiten.

Weiß, S.; Militzer, K.-E. und Gramlich, K. 1993. *Thermische Verfahrenstechnik.* Leipzig / Stuttgart, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. 636 Seiten.

Welter, Philippe. 2014. *Photovoltaik für Einsteiger, Teil 6: Der Aufbau eines Solarmoduls.* Photon, Heft 6/2014. Seite 34–39.

Wissing, Lothar. 2012. *National Survey Report of PV Power Applications in Germany 2011.* Jüllich, IEA Co-operative Programme on Photovoltaic Power Systems, Task 1: Exchange and dissemination of information on PV power systems. Juli 2012. 34 Seiten.

Wolf, Oskar. 2014. Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS). *Telefonische Mitteilung*, 30.07.2014, Leipzig.

Kapitel 5

Accurec Recycling GmbH. 2013. *Accurec.* 3rd International Conference on PV Module Recycling, Rom, 28. Februar 2013. Brüssel, PV Cycle. 14 Folien.

Agentur für erneuerbare Energien (AEE). 2016. *Datenblatt: Solar.* In: http://www.foederal-erneuerbar.de/uebersicht/bundeslaender/BW%7CBY%7CB%7CBB%7CHB%7CHH%7CHE%7CMV%7CNI%7CNRW%7CRLP%7CSL%7CSN%7CST%7CSH%7CTH%7CD/kategorie/solar/auswahl/769-neu_installierte_lei/#goto_769, Agentur für erneuerbare Energien, föderal erneuerbar, Bundesländer mit neuer Energie. abgerufen: April 2016.

Auer, Agathe. 2015. *Photovoltaic module decommissioning and recycling in Europe and Japan: current methodologies, norms and future trends.* Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Master Thesis. 75 Seiten.

Battistutti, R. 2013. *Qualität in der PV-Branche – warum Recycling ein sehr wichtiges Thema wird.* Wien, Round Table „Recycling von PV-Modulen", 06. November 2013. Green jobs Austria. 30 Folien.

Beckmann, Jürgen. 2010. *Entsorgung von Photovoltaik-Anlagen aus Sicht des Bayerischen Landesamts für Umwelt.* Bayern Innovativ, Cluster-Forum Recycling in der Photovoltaik, München, 01.12.2010. 16 Folien.

Beckmann, Jürgen. 2012. *Wieso Abfall? Entsorgung von Photovoltaik-Anlagen.* Installateur, Heft 02.12. Seite 28-31.

Behrendt, Siegfried; Erdmann, Lorenz; Marwede, Max und Caporal, Sophie. 2010. *Roadmap: Ressourceneffiziente Photovoltaik 2020+*. Wuppertal, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Ressourceneffizienz Paper 9.1, Arbeitspaket 9 des Projekts: Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRess). 152 Seiten.

Bierwirth, Christian. 2008. *Transportwirtschaft.* Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Juristische und Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Lehrstuhl für Produktion und Logistik. Vorlesungsfolien. 218 Folien.

Bierwirth, Christian. 2009. *Supply Chain Management.* Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Juristische und Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Lehrstuhl für Produktion und Logistik. Vorlesungsfolien. 196 Folien.

Binder, Manuel. 2013. *Round Table „Recycling von PV-Modulen*". Wien, Green jobs Austria, 06. November 2013. Tagungsband. 18 Seiten.

Bohland, John; Dapkus, Todd; Kamm, Kristin und Smigielski, Ken. 1998. *Photovoltaics as hazardous materials; the recycling solution.* In: Fthenakis *et al.* (Hrsg.). 1998. Report on the Workshop: Photovoltaics and the Environment 1998. Keystone, CO, Brookhaven National Laboratory. Seite 33-40.

Bombach, E.; Röver, I.; Müller, A.; Schlenker, S.; Wambach, K.; Kopecek, R. und Wefringhaus, E. 2006. *Technical Experience during Thermal and Chemical Recycling of a 23 year old PV Generator formerly installed on Pellworm Island.* 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Deutschland, 4-8 September 2006. Konstanz, EU-PVSEC. 6 Seiten.

Brellinger, Christoph. 2014. *Cost for the Recycling and registration of Solar Modules – a practical example.* Intersolar Europe 2014, ICM München, 02.06.2014–04.06.2014. take-e-way GmbH, Hamburg. 22 Folien.

Brellinger, Christoph. 2016. Leiter Marketing & Kommunikation, take-e-way GmbH. *Schriftliche Mitteilung.* 03. Dezember 2016, Leipzig.

Brendel, R.; Dullweber, T.; Gogolin, R.; Hannebauer, H.; Harder, N.-P.; Hensen, J.; Kajari-Schröder, S.; Peibst, R.; Petermann, J.H.; Römer, U.; Schmidt, J.; Schulte-Huxel, H. und Steckenreiter, V. 2013. *Recent Progress and Options for Future Crystalline Silicon Solar Cells.* In Veröffentlichungen von: 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, Frankreich, 30.09.2013–04.10.2013. Seite 676-690. ISBN: 3-936338-33-7.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). 2013. *Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder.* Bonn, Hausdruckerei BMU, 2013. Referat WA II 1. 77 Seiten.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). 2012. *Eckpunkte des neuen Kreislaufwirtschaftsgesetzes*. In: www.bmub.bund.de/P1745, abgerufen: 17. Juni 2015.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). 2015. *Referentenentwurf des Bundesumweltministeriums zum Gesetz zur Neuordnung des Gesetzes über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG).* In: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/elektrog_novelle_entwurf_bf.pdf, abgerufen: 06.08.2015.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). 2007. *Gesetz und Verordnung zur Vereinfachung der abfallrechtlichen Überwachung*. In: www.bmub.bund.de/N7057, abgerufen: 01. Oktober 2015.

Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik e.V. (BME). O.J. *BME-Preisspiegel Frachten: Straßengüterverkehr national und international / Leseprobe.* In: https://www.bme.de/fileadmin/_horusdam/1291-preisspiegel_frachten_leseprobe_2.pdf, abgerufen: 12.03.2017.

Bundesverwaltungsgericht (BVerwG). 2009. *Urteil zum Aktenzeichen: BVerwG 7 C 20.08.* Bundesverwaltungsgericht Leipzig, 26.11.2009. 28 Seiten.

Bunner, Christopher. 2010. *Terrestrial Module Fabrication and Assembly Technologies*. In: Fraas, Lewis und Partain, Larry. 2010. Solar Cells and their applications. Second edition. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN: 978-0-470-44633-1. Seite 159-170.

Cellere, Giorgio; Forstner, Hali; Falcon, Tom; Zwegers, Martijn; Bernreuter, Johannes; Xing, Guoqiang; Haase, Josef; Jooss, Wolfgang; Antoniadis, Homer; Coletti, Gianluca; Meyer, Sylke; Schoenfelder, Stephan; Preu, Ralf; Glatthaar, Markus; Lin, KC; Metz, Axel; Fischer, Markus; Gerlach, Alexander; Lim, Ji Won; Mette, Ansgar; Mette, Michael; Mohr, Andreas; Müller, Jörg; Petter, Kai; Spieß, Thomas; Stassen, Arno; Fuchs, Stefan; Tous, Loic; Rüland, Eric; Richter, André; Burger, Meyer; Li, Chi-Chun; Wang, Kirin; Luan, Andy; Vlasenko, Timur; Buchovskaya, Iryna; Anspach, Oliver; Jooß, Wolfgang; Julsrud, Stein; Rostan, Hannes; Delahaye, Franck; Cho, Jaehwi; Chang, Tony; Raithel, Stephan; Schicht, Thomas; Vedde, Jan; Bartel, Til; Wohlfart, Peter; Yakovlev, Sergey; Neuhaus, Holger; Demenik, Grigory; Luchies, Jan Marc; Pentinga, Rob; Trube, Jutta; Luedemann, Kristin; Liu, Yong; Dornberger, Erich und Westermeier, Christian. 2016. *International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV):2015 Results including maturity reports.* Brüssel, SEMI Europe. ITRPV, Seventh Edition. Oktober 2016. 52 Seiten.

centrotherm photovoltaics AG. 2009. *Auf dem Weg zur Netzparität: Webcast von centrotherm photovoltaics stösst bei Anlegern und Pressevertretern auf reges Interesse.* In: http://www.centrotherm.de/de/presse/news/2009/2009/browse/2/article/auf-dem-weg-zur-netzparitaet-webcast-von-centrotherm-photovoltaics-stoesst-bei-anlegern-und-pressev.html?tx_ttnews%5BbackPid%5D=178&cHash=7911b67cc4, abgerufen: 01.07.2017.

Choi, Jun-Ki und Fthenakis, Vasilis. 2010. *Design and Optimization of Photovoltaics Recycling Infrastructure.* Environmental Science & Technology, Band 44, Heft 22, 15. November 2010. Seite 8678-8683.

Choi, Jun-Ki und Fthenakis, Vasilis. 2014a. *Photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives.* IEA PVPS TASK 12 Workshop, Amsterdam, 23. September 2014. IEA-PVPS. 18 Folien.

Choi, Jun-Ki und Fthenakis, Vasilis. 2014b. *Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives.* Journal of Cleaner Production, Band 66, März 2014, Seite 443-449.

Cucchiella, Federica; D'Adamo, Idiano und Rosa, Paolo. 2015. *End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, Band 47, Juli 2015, Seite 552-561, ISSN 1364-0321.

DeGraaff, David; Lacerda, Ryan und Campeau, Zach. 2011. *Degradation Mechanisms in Si Module Technologies Observed in the Field; Their Analysis and Statistics.* Photovoltaic Module Reliability Workshop, Denver, Golden, Colorado, USA, 16. Februar 2011. NREL. 25 Folien.

Deutsche Bundesbank. 2015. *Zeitreihe BBEX3.M.USD.EUR.BB.AC.A02: Euro-Referenzkurs der EZB / 1 EUR = ... USD / Vereinigte Staaten.* In: https://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/Zeitreihen_Datenbanken/Aussenwirtschaft/aussenwirtschaft_details_value_node.html?https=1&https=1&listId=www_s331_b01012_2&tsId=BBEX3.M.USD.EUR.BB.AC.A02, abgerufen: 16.12.2015.

Dickhaus, Thorsten. 2015. *Die Weibullverteilung (Zuverlässigkeits-, Lebensdaueruntersuchungen).* Bremen, Universität Bremen, Fakultät 3: Mathematik, Institut für Statistik, Working group Mathematical Statistics. Lehrmaterial. 31 Seiten.

Domschke, Wolfgang und Scholl, Armin. 2010. *Logistik: Rundreisen und Touren.* 5., überarbeitete und aktualisierte Auflage. München, R. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH. 296 Seiten. ISBN: 978-3-486-59093-7.

Dupuis, Julien; Saint-Sernin, Etienne; Nichiporuk, Oleksiy; Lefillastre, Paul; Bussery, Denis und Einhaus, Roland. 2012. *NICE module technology - from the concept to mass production: a 10 years review.* 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, Texas, USA, 3.-8. Juni 2012. 4 Seiten.

ECO-MC GmbH. 2016. *Preise Poly-Silizium / Wafer / Zellen.* In: https://www.eco-mc.de/infos/marktpreise/41-preisentwicklung-poly-silizium.html, abgerufen: 03.01 2017.

ENF Ltd. 2016. *PV Industry Data – Solar Worldmap*. In: http://www.enfsolar.com, abgerufen: 12.06.2015.

Enkhardt, Sandra. 2014. *IHS erwartet Ende des Preisverfalls bei Solarglas.* In: http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/ihs-erwartet-ende-des-preisverfalls-bei-solarglas_100017064/, abgerufen: 07.05.2015.

European Commission. 2014. *Frequently Asked Questions on Directive 2012/19/EU on Waste Electrical and Electronic Equipment.* In: http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/faq.pdf, abgerufen: 30. Juli 2015.

Fenebris GbR - Expertenzirkel Unternehmensbewertung. o. J. *Basiszinssatz gemäß IDW.* In: http://www.basiszinskurve.de/basiszinssatz-gemaess-idw.html, abgerufen: 11.05.2017.

Fiedler, Frank. 2013. *„Wanted" – PV Module dringend gesucht. Der Photovoltaik-Zweitmarkt in Europa.* Wien, Round Table „Recycling von PV-Modulen", 06. November 2013. Green jobs Austria. 14 Folien.

Fischer, Klaus; Koch, Michael und Metzger, Jörg. 2012. *Photovoltaikmodule – Umweltfreundlichkeit und Recyclingmöglichkeiten.* Stuttgart, Universität Stuttgart, Abschlussbericht. 54 Seiten.

Franke, Petra. 2015. Fachzeitschrift: photovoltaik. *Schriftliche Mitteilung*. 29. Oktober 2015, Leipzig.

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). o.J. *Infoblatt 5/5: Bahngüterverkehr.* Karlsruhe, Fraunhofer ISI. 2 Seiten.

FRELP. 2014. *Full Recovery End of Life Photovoltaik – The Project.* In: https://frelp.info/the-project/, abgerufen: 29.07.2016.

Friege, Henning und Kummer, Beate. 2012a. *Ressourcenschonung am Beispiel der Elektro- und Elektronikaltgeräte: III. Photovoltaik-Module.* Müll und Abfall, Ausgabe 9/2012. Seite 456-463.

Friege, Henning und Kummer, Beate. 2012b. *PV-Module: Optionen Für Recycling und Ressourcenschonung.* Energiewirtschaftliche Tagesfragen: Zeitschrift Für Energiewirtschaft, Recht, Technik und Umwelt, Band 62, Heft 10 (2012). Seite 54-58.

Frisson, L.; Lieten, K.; Bruton, T.; Declercq, K.; Szlufcik, J.; De Moor, H.; Goris, M.; Benali, A. und Aceves, O. 2000. *Recent improvements in industrial PV module recycling.* 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, UK, 01.05.-05.05.2000. EU PVSEC. 4 Seiten.

Fthenakis, V. M. und Moskowitz P.D. 1999. *The Value and Feasibility of Proactive Recycling.* American Institute of Physics (AIP) Conference Proceedings, National Center for Photovoltaics (NCPV), Denver, USA, 09.09.-11.09.1998. Melville. Seite 332-340. DOI: 10.1063/1.57908.

Fthenakis, V.M. und Kim, H.C. 2011. *Photovoltaics: Life-cycle analyses.* Solar Energy, Band 85, Heft 5, August 2011. Seite 1609–1628.

Fthenakis, Vasilis. 2000. *End-of Life Management and Recycling of PV Modules.* Energy Policy, Band 28, 2000. Seite 1051-1058.

Gattermann, Jana. 2013. *Produktverantwortung nach dem Elektrogesetz und der Altfahrzeugverordnung: Wirkung auf eine innovative Produktgestaltung.* Kassel, kassel university press GmbH. Interdisciplinary Research on Climate Change Mitigation and Adaption, Band 3. 364 Seiten. ISBN: 978-3-86219-484-1.

Geerligs, Bart. 2015. *Cu-PV Project.* Resource efficiency cluster meeting, Brüssel, 16.09.2015. Brüssel, Europäische Kommission. 22 Folien.

Giesen, Tim; Adamietz, Raphael; Kreck, Guido; Iseringhausen, Tobias und Wertz, Roland. 2014. *Overview of challanges in ultrathin substrate handling.* Photovoltaics international, 24. Edition, zweites Quartal, Mai 2014. S. 10-18.

Goetzberger, A. und Hoffmann, V.U. 2010. *Photovoltaic Solar Energy Generation.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, optical sciences. 232 Seiten. ISBN: 978-3-642-06260-5.

Goris, M.J.A.A.; Rosca, V.; Geerligs, L.J. und de Gier, B. 2015. *Production of recyclable crystalline Si PV Modules.* In Veröffentlichungen von: 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Deutschland, 14.–18. September 2015. Seite 1925-1929. ISBN: 3-936338-39-6.

Grundmann, Marius. 2006. *The Physics of Semiconductors, An Introduction Including Devices and Nanophysics.* Springer-Verlag Berlin-Heidelberg. 689 Seiten. ISBN: 3-540-25370-X.

Haas, Hans-Dieter und Schlesinger, Dieter Matthew. 2007. *Umweltökonomie und Ressourcenmanagement.* Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft (WBG). 160 Seiten. ISBN: 978-3-534-20029-0.

Hahne, Axel und Hirn, Gerhard. 2010. *Recycling von Photovoltaik-Modulen.* Bonn, BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe, Büro Bonn. projektinfo 02/10. 4 Seiten.

Hasselbrink, Ernest; Anderson, Mike; Defreitas, Zoe; Mikofski, Mark; Shen, Yu-Chen; Caldwell, Sander; Terao, Akira; Kavulak, David; Campeau, Zach und DeGraaff, David. 2013. *Validation of the PVLife Model Using 3 Million Module-Years of Live Site Data.* In Veröffentlichungen von: IEEE 39. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Tampa, Florida, USA, 16.–21. Juni 2013. Seite 7–12.

Hesselmann kommunikation GmbH. 2015. *Neuordnung Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG2: Gesetz zur Neuordnung des Rechts über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten.* In: http://www.elektrogesetz.de/wp-content/uploads/2015/07/hesselmann_elektrog2_de_20150710.pdf, abgerufen: 05.08.2015.

Hesselmann, Christoph. 2015. *ElektroG2 passiert Bundestag und Bundesrat.* In: http://www.elektrogesetz.de/elektrog2-passiert-bundestag-und-bundesrat/, abgerufen: 05.08.2015.

Industrie- und Handelskammer (IHK) Karlsruhe. o.J. *Novelle der EU-Abfallrahmenrichtlinie in Kraft getreten.* In: http://www.karlsruhe.ihk.de/innovation/umwelt/Abfall/Kreislaufwirtschaftsgesetz/708762/NovelleEU Abfallrahmenrichtlinie.html, abgerufen: 16. Juli 2015.

Jones-Albertus, Rebecca; Feldman, David; Fu, Ran; Horowitz, Kelsey und Woodhouse, Michael. 2016. *Technology advances needed for photovoltaics to achieve widespread grid price parity.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Band 24, Heft 9, September 2016. Seite 1272-1283.

Jung, Byungjo; Park, Jongsung; Seo, Donghwan und Park, Nochang. 2016. *Sustainable System for Raw-Metal Recovery from Crystalline Silicon Solar Panels: From Noble-Metal Extraction to Lead Removal.* ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 08. Juli 2016 (webversion). 5 Seiten. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b00894.

Kang, Sukmin; Yoo, Sungyeol; Lee, Jina; Boo, Bonghyun und Ryu, Hojin. 2012. *Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules.* Renewable Energy, Band 47, November 2012. Seite 152-159.

Kernbaum, Sebastian und Hübner, Tammo. 2013. *Recycling von Photovoltaikmodulen.* In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Goldmann, D. (Hrsg.). 2013. Recycling und Rohstoffe, Band 6. Neuruppin, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Seite. 545-557.

Kille, Christian und Schmidt, Norbert. 2008. *Wirtschaftliche Rahmenbedingungen des Güterverkehrs: Studie zum Vergleich der Verkehrsträger im Rahmen des Logistikprozesses in Deutschland.* Nürnberg, Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS), Arbeitsgruppe für Technologien der Logistik-Dienstleistungswirtschaft (ATL). 90 Seiten.

Klugmann-Radziemska, Ewa und Ostrowski, Piotr. 2010. *Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules.* Renewable Energy, Band 35, Heft 8, August 2010. Seite 1751-1759.

Knackfuß, Günter. 2012. *Recycling von Solarmodulen in Europa.* Interview mit Jan Clyncke, Geschäftsführer PV CYCLE. In: https://www.springerprofessional.de/entsorgung/recycling/recycling-von-solarmodulen-in-europa/6596164, abgerufen, 22.06.2016.

Köntges, M.; Kajari-Schröder, S.; Kunze, I. und Jahn, U. 2011. *Crack statistic of crystalline silicon photovoltaic modules.* In Veröffentlichungen von: 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), WIP, Hamburg, Deutschland, September 2011. Seite 3290-3294.

Köntges, Marc; Kurtz, Sarah; Packard, Corinne; Jahn, Ulrike; Berger, Karl A.; Kato, Kazuhiko; Friesen, Thomas; Liu, Haitao und Van Iseghem, Mike. 2014. *Review of Failures of Photovoltaic Modules*. IEA PVPS Task 13 - International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme (www.iea-pvps.org). Performance and Reliability of Photovoltaic Systems, Subtask 3.2: Report IEA-PVPS T13-01:2014, März 2014. 140 Seiten. ISBN 978-3-906042-16-9.

Kraft, Holger. 2007. *Investition und Finanzierung.* Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Juristische und Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Lehrstuhl Betriebswirtschaftliche Steuerlehre. Vorlesungsunterlagen. 232 Folien.

Kreutzmann, Anne. 2016. *Willkommen zurück im Käufermarkt*. Photon, Heft 11/2016, Seite 16-18.

Kuehnle , Elke. 2014. *Solarmodulrecycling – Hochwertiges Modulrecycling geht weit über die WEEE-Richtlinien-Vorgaben hinaus.* Sonnenenergie, Heft 1/2014. Seite 28-31.

Küffner, Georg. 2011. *Hochreine Rohstoffe aus ausgedienten Solarmodulen.* Frankfurter Allgemeine Zeitung, 22.12.2011. In: www.faz.net/-gy9-6w0q8, abgerufen: 01.02.2017.

Kummer, Beate. 2011. *RESOLAR-Projekt mit interessanten Ergebnissen abgeschlossen.* Müll und Abfall, Heft 5–2011, Seite 234-240.

KunststoffWeb GmbH. 2017. *Rohstoffbörse.* In: https://rohstoffe.kunststoffweb.de/index.html, abgerufen: 05.01.2017.

La Mia Energia SCARL. 2015a. *PV-MOREDE: Business and marketing plan.* Cassino, Frosinone, Italien, La Mia Energia SCARL, Deliverable D 5.1 Draft. Agreement Number: ECO/12/333078/SI2.658616. 6 Seiten.

La Mia Energia SCARL. 2015b. *PV-MOREDE: Marketing Analysis including Pestel SWOT and Porter Analysis.* Cassino, Frosinone, Italien, La Mia Energia SCARL, Deliverable D 5.3. Agreement Number: ECO/12/333078/SI2.658616. 6 Seiten.

Laitenberger, Jörg. 2008. *Die Bedeutung der Finanzierung für Investitionsentscheidungen*. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Juristische und Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Lehrstuhl Finanzierung und Banken. Vorlesungsunterlagen. 19 Folien.

Lange, Alina. 2015. PV CYCLE aisbl. *Schriftliche Mitteilung*. 29. Oktober 2015, Leipzig.

Latunussa, Cynthia E. L.; Mancini, Lucia; Blengini, Gian Andrea; Ardente, Fulvio und Pennington, David. 2016. *Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels.* Luxemburg (Luxemburg), Publications Office of the European Union, März 2016. JRC Technical Reports. 83 Seiten. ISBN: 978-92-79-57277-7.

Lüdemann, Ralf; Schmidhuber, Helge; Wirth, Harry; Brendel, Rolf; Bothe, Karsten; Rech, Bernd; Powalla, Michael und Oelting, Stefan. 2005. *Photovoltaik – Innovationen bei Solarzellen und Modulen.* Bonn, FIZ Karlsruhe GmbH, themeninfo III/05. 16 Seiten. ISSN: 1610-8302.

McDonald, N.C. und Pearce, J.M. 2010. *Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules.* Energy Policy, Band 38, Heft 11, November 2010, Seiten 7041-7047.

McEvoy, A., Markvart, T. und Castaäner, Luis. (Ed.) 2012. *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications.* Second edition. Oxford, UK, Academic Press, Elsevier Ltd. 1244 Seiten. ISBN: 978-0-12-385934-1.

Mertens, Konrad. 2011. *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis.* München, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. 290 Seiten. ISBN: 978-3-446-42172-1.

Meyer, S.; Timmel, S.; Richter, S.; Werner, M.; Gläser, M.; Swatek, S.; Braun, U. und Hagendorf, C. 2014. *Silver nanoparticles cause snail trails in photovoltaic modules.* Solar Energy Materials and Solar Cells, Band 121, Februar 2014. Seiten 171–175.

Müller, Anja; Wambach, Karsten und Alsema, Erik. 2006. *Life Cycle Analysis of Solar Module Recycling Process.* Materials Research Society Symposium Proceedings, Band 895. 6 Seiten.

Nageldiek, Kathrin. 2016. Saperatec GmbH – Executive Assistant. *Schriftliche Mitteilung*. 02. August 2016, Leipzig.

Natcore Technology Inc. 2015. *Natcore Technology Develops Solar Cell That Eliminates Use of Silver.* In: http://www.natcoresolar.com/news/natcore-technology-develops-solar-cell-that-eliminates-use-of-silver/, abgerufen: 17.03.2016.

New Media Publisher GmbH. 2017. *Rohstoffe & Preise.* In: http://plasticker.de/preise/preise_monat_multi.php, abgerufen: 05.01.2017.

Nusser, Jens und Brüning, Ralf. 2012. *Wiederverwendung von Elektrogeräten neu definiert.* In: http://www.elektroniknet.de/elektronikfertigung/ems/artikel/91443/, abgerufen: 27.07.2015.

Olschok, Christopher; Pfeifer, Moritz; Zech, Matthias; Schmid, Markus; Zehner, Mike und Becker, Gerd. 2012. *Untersuchung von Handhabungsfehlern bei der Montage und Installation von PV Modulen.* In Veröffentlichungen von: 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie,OTTI, Bad Staffelstein, Deutschland, 2012. Seite 202.

Pacholke, Thomas. 2016. Hecker Glastechnik GmbH & Co. KG. *Schriftliche Mitteilung*. 21. Dezember 2016, Leipzig.

Palitzsch, Wolfram. 2013. *Processing of PV modules: Chemical baths.* 3rd International Conference on PV Module Recycling, Rom, 28. Februar 2013. Brüssel, PV Cycle. 25 Folien.

Pankrath, Otto. 2014. *Rechtliche Restriktionen zum PV-Recycling in Deutschland.* Leipzig, Universität Leipzig, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Professur für Umwelttechnik und Umweltmanagement, Bachelorarbeit. 50 Seiten.

Park, Jongsung und Park, Nochang. 2014. *Wet Etching Processes for Recycling Crystalline Silicon Solar Cells from End-of-life Photovoltaic Modules.* RSC Advances, Heft 66, 2014. Seite 34823−34829.

Park, Jongsung; Kim, Wangou; Cho, Namjun; Lee, Haksoo und Park, Nochang. 2016. *An eco-friendly method for reclaimed silicon wafers from a photovoltaic module: from separation to cell fabrication.* Green Chemistry, Band 18, Heft 6, 21. März 2016. Seite 1706-1714.

Philipp, Daniel. 2014. *Accelerated Service Live Testing – How fast can we go?* Intersolar Europe 2014, ICM München, 02.06.2014–04.06.2014. Fraunhofer ISE. 33 Folien.

photovoltaik. 2014. *Repowering kann sich lohnen.* In: http://www.photovoltaik.eu/Gentner.dll/PL_110949_619973, Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG. Abgerufen: 01.03.2016.

Pohl, André; Dukat, Malte; Kummer, Beate und Nolden, Monika. 2010. *RESOLAR - Entwicklung eines europaweiten Rücknahmesystems für Solarmodule.* Osnabrück, Hellmann Process Management GmbH & Co. KG, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt RESOLAR. 90 Seiten.

Polverini, Davide; Field, Michael; Dunlop, Ewan and Zaaiman, Willem. 2013. *Polycrystalline silicon PV modules performance and degradation over 20 years.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Band 21, Heft 5, August 2013. Seite 1004–1015.

Posch, Alfred. 2006. *Zwischenbetriebliche Rückstandsverwertung - Kooperationen für eine nachhaltige Entwicklung am Beispiel industrieller Verwertungsnetze.* 1. Auflage, Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH. 352 Seiten. ISBN: 978-3-8350-0204-3.

Power & Energy Solutions (PES). 2014. *Cutting costs in PV.* Power & Energy Solutions Europe Edition Solar/PV. Heft 24. Seite 44-47.

Pozza, Alberto und Sample, Tony. 2015. *Crystalline silicon PV module degradation after 20 years of field exposure studied by electrical tests, electroluminescence, and LBIC*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Band 24, Heft 3, März 2016. Seite 368-378.

Proteus Solutions GbR. 2016. *PV-Statistik: installierte Anlagenleistung.* In: https://www.proteus-solutions.de/~Photovoltaik/PV-Statistik:tM.F06!sM.PV06.asp, abgerufen: April 2016.

PV CYCLE. 2016. *Operational Status Report: Europe – 02/2016.* In: http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/2016/01/PV-CYCLE-Status-Report-feb-2016.pdf, abgerufen: 10.03.2016.

PVinsights Co. LTD. 2016. *Monatliche Meldungen*, In: http://pvinsights.com/DE/, abgerufen: 19.12.2016.

PVinsights Co., LTD. 2017. *Solar PV Wafer Weekly Spot Price.* In: http://pvinsights.com/index.php, abgerufen: 04.01.2017.

Radziemska, Ewa; Ostrowski, Piotr; Cenian, Adam und Sawczak, Mirosław. 2010. *Chemical, thermal and laser processes in recycling of photovoltaic silicon solar cells and modules.* Ecological Chemistry and Engineering S - The Journal of Society of Ecological Chemistry and Engineering, Band 17, Nummer. 3, 2010. Seite 385-391.

Reil, F.; Althaus, J.; Vaaßen, W.; Herrmann, W. und Strohkendl, K. 2010. *The Effect of Transportation Impacts and Dynamic Load Tests on the Mechanical and Electrical Behaviour of Crystalline PV Modules.* In Veröffentlichungen von: 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), WIP, Valencia, Spanien, 06.-09. September 2010. Seite 3989–3992.

Reil, Florian. TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH. *Schriftliche Mitteilung*. 05.November 2015, Leipzig.

Rentzing, Sascha. 2010. *Recycling von Modulen: Solar-Konzerne kämpfen um ihr grünes Image.* In: http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/recycling-von-modulen-solar-konzerne-kaempfen-um-ihr-gruenes-image-a-688779.html, abgerufen: 01.02.2017.

Rhein-Ruhr-Institut für Sozialforschung und Politikberatung e.V. (RISP). o.J. *Kosten im Blick.* In: http://www.risp-duisburg.de/files/3._kosten_im_blick.pdf, abgerufen: 13.03.2017.

Richter, Armin. 2011. *Schadensbilder nach Wareneingang und im Reklamationsfall.* 8. Workshop des TÜV Rheinland zu Photovoltaik-Modultechnik, Köln, 24. und 25. November 2011. 18 Folien.

Rindelhardt, U., Teichmann, G. und Lang, D. 1995. *Projektabwicklung und Ergebnisse des Bund-Länder-1000-Dächer-Photovoltaik-Programmes in Sachsen.* Dresden, Forschungszentrum Rossendorf e.V., September 1995. FZR-109. 91 Seiten.

Ritter, Frank. 2009. *Generierung von Lebensdauerkennwerten.* In: Feifel, S.; Walk, W.; Wursthorn, S. und Schebek, L. (Hrsg.). Ökobilanzierung 2009 – Ansätze und Weiterentwicklungen zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit. Tagungsband Ökobilanz-Werkstatt 2009. Freising. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Scientific Publishing. 295 Seiten. ISBN: 978-3-866-44-421-8.

Ritter, Frank. 2011. *Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen – Modellierung und praxisnahe Prognose.* Darmstadt, Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 10 Juni 2011. 265 Seiten. ISBN: 978-3-942886-00-0.

Ritter, Jan. 2014. Hanwha Q Cells GmbH. *Persönliche Mitteilung.* 11.02.2014, Bitterfeld-Wolfen OT Thalheim.

Sanchez-Friera, P.; Galan, J.E.; Guarde, D. und Manjon, D. 2004. *Application of intelligent materials to the design of solar modules for their active disassembly and the recycling and reuse of their components.* In Veröffentlichungen von: 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, Frankreich, 7.–11. Juni 2004. Seite 2329-2331.

Sander, Knut; Schilling, Stephanie; Wambach, Kartsen; Schlenker, Sylke; Müller, Anja; Springer, Johann; Fouquet, Dörte; Jelitte, Andrea; Stryi-Hipp, Gerhard und Chrometzka, Thomas. 2007. *Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystem für photovoltaische Produkte.* Hamburg, Ökopol GmbH, November 2007. Gefördert durch das BMU: Förderkennzeichen 03MAP092. 199 Seiten.

Sander, Knut; Zangl, Stéphanie; Reichmuth, Matthias und Schröder, Gerd. 2004. *Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung.* Hamburg / Leipzig. Ökopol - Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg & IE – Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig. Umwelt-Forschungs-Plan, FKZ 202 33 304, Endbericht. 109 Seiten.

Sartori, Davide; Catalano, Gelsomina; Genco, Mario; Pancotti, Chiara; Sirtori, Emanuela; Vignetti, Silvia und Del Bo, Chiara. 2014. *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects: Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020.* Brüssel, EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Regional and Urban policy, REGIO DG 02 – Communication, Dezember 2014. 364 Seiten. ISBN: 978-92-79-34796-2.

Schönherr, Petra. 2013. *Stoffkreisläufe beim Umgang mit begrenzten Ressourcen.* Wachstum der deutschen Industrie bei beschränkt verfügbaren Ressourcen – wie geht das?, Veranstaltung im Rahmen der TerraTec 2013, Leipzig, 31.01.2013. Leipzig, Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V. (DGAW). 19 Folien.

Schultz, Ronald; Lehmann, Dieter und Weiß, Marcus. 2013. *Verfahren und Anlage zur Wiedergewinnung von Metallen aus Verbundmaterialien, insbesondere Siliciumsolarmodulen. Dünnschichtsolarmodulen, LCD-Displays od. dgl.* Europäisches Patentamt, Patentblatt 2013/07, Veröffentlicht am 13.02.2013. Anmeldedatum: 07.08.2012. Patentnummer: EP 2556893 A2.

Schwarz, Erich J. 1998. *Ökonomische Aspekte regionaler Verwertungsnetze.* In: Strebel, Heinz und Schwarz, Erich. (Hrsg.). 1998. Kreislauforientierte Unternehmenskooperationen: Stoffstrommanagement durch innovative Verwertungsnetze. Wien, R. Oldenbourg Verlag. Seite 11-26. ISBN: 3-486-24493-0.

Seitz, Matthias; Kroban, Małgorzata; Pitschke, Thorsten und Kreibe, Siegfried. 2014. *Ökoeffizienz von Photovoltaikmodulen.* Müll und Abfall, Heft 2/2014, Seite 72-77.

Seltmann, Thomas. 2015. *Solarmodule 40 Jahre zuverlässig.* In: http://www.solarbetreiber.de/index.php/aktuelles-forschung-und-entwicklung/solarmodule-40-jahre-zuverlaessig.html, abgerufen: 25.01.2016.

Sepanski, Annett; Reil, Florian; Vaaßen, Willi; Janknecht, Eckart; Hupach, Uwe; Bogdanski, Nicolas; van Heeckeren, Bettina; Schmidt, Heribert; Bopp, Georg; Laukamp, Hermann; Grab, Robin; Philipp, Severin; Thiem, Horst; Huber, Josef; Haselhuhn, Ralf; Häberlin, Heinrich; Krutzke, Andreas; Neu, Benedikt; Richter, Armin; Bansemer, Björn und Halfmann, Michael. 2015. *Leitfaden: Bewertung des Brandrisikos in PV-Anlagen und Erstellung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung.* Köln, TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH, Abschlussbericht. März 2015. 308 Seiten.

Sieg, Mirco. 2015. *Schmelzende Rückseitenfolien, kaputte Zellen und noch mehr Hotspots – Schwarzes oder weißes Schaf?* In: http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/schmelzende-rckseitenfolien--kaputte-zellen-und-noch-mehr-hotspots---schwarzes-oder-weies-schaf_100020838/, abgerufen: 08.12.2015.

Smith, Sam. 2017. Marketing Manager, Jiangsu Karen Aluminum Co., Ltd. *Schriftliche Mitteilung*. 04. Januar 2017, Leipzig.

Sze, S.M. und Ng, Kwok K. 2007. *Physics of Semiconductor Devices.* Dritte Auflage. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. 815 Seiten. ISBN: 0-471-14323-5.

Tammaro, Marco; Rimauro, Juri; Fiandra, Valeria und Salluzzo, Antonio. 2015. *Thermal treatment of waste photovoltaic module for recovery and recycling: Experimental assessment of the presence of metals in the gas emissions and in the ashes.* Renewable Energy, Band 81, September 2015. Seite 103-112.

TU Bergakademie Freiberg. 2005. *Entwicklung eines Verfahrens zum Recycling von Solarzellen und Solarmodulen.* Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Institut für anorganische Chemie, Abschlussbericht: 5/2005. 20 Seiten.

TÜV Rheinland. 2010. *Bauartzertifizierung von PV-Modulen entsprechend IEC 61215:2005 bzw. IEC 61646:2008.* Köln, TÜV Rheinland Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH, Geschäftsfeld Regenerative Energien, Oktober 2010. 6 Seiten.

TÜV Rheinland. 2014. *Quality Monitor - Solar 2014*. In: http://www.tuv-e3.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Quality_ monitor_Solar_2014_english.pdf, abgerufen: 8. Januar 2015.

Ullrich, Sven. 2014. *Kosten fürs Modulrecycling stehen fest.* In: http://www.photovoltaik.eu/Archiv/Meldungsarchiv/Kosten-fuers-Modulrecycling-stehen-fest,QUlEPTYwNTc2MiZNSUQ9MTEwOTQ5.html, abgerufen: 01.02.2017.

Vahrenkamp, Richard. 2003. *Quantitative Logistik für das Supply-Chain-Management.* München, R. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH. 296 Seiten. ISBN: 3-486-27369-8.

Verkehrsrundschau. 2008. *Gut gerechnet.* In: http://www.verkehrsrundschau.de/fm/3576/Kostenrechnung.pdf, abgerufen: 13.03.2017.

Viga, R. 2008. *Zuverlässigkeit und Produktlebenszyklus.* Duisburg, Universität Duisburg-Essen, Abteilung Elektro- und Informationstechnik, Elektronische Bauelemente und Schaltungen (EBS). Lehrmaterial der Veranstaltung: Grundlagen ingenieurwissenschaftlichen Arbeitens, GiA Kapitel 6 Teil 1. 27 Folien.

Volkmann, Dirk. 2015. *Beseitigen von technischen Mängeln (Lösungsansätze und Kostenvergleich).* Fachvortrag, Tettnang, 03.03.2015. Regionalwerk Bodensee GmbH & Co. KG. 40 Folien.

Volkmann, Dirk. 2015. Volkmann Consult – Corporate Advisors. *Schriftliche Mitteilung*. 5. November 2015, Leipzig.

Wagner, Andreas. 2010. *Photovoltaik Engineering: Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung.* 3. Erweiterte Auflage. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 441 Seiten. ISBN: 978-3-642-05412-9.

Wallner, Gernot M. 2013. *Recyclierbarkeit von PV-Einkapselungsfolien aus Kunststoff.* Wien, Round Table „Recycling von PV-Modulen“, 06. November 2013. Green jobs Austria. 13 Folien.

Wambach, Karsten und Schlenker, Sylke. 2004. *Recycling von Photovoltaikmodulen aus kristallinen Solarzellen.* Umweltpanorama, Heft 6, 15. November 2004. Ab Seite 20.

Wambach, Karsten. 2013. *Status und Zukunftsperspektiven des Recyclings von PV-Modulen.* Wien, Round Table „Recycling von PV-Modulen“, 06. November 2013. Green jobs Austria. 25 Seiten.

Wambach, Karsten. 2014. *Recycling of PV-Modules in Practice.* Intersolar Europe 2014, ICM München, 02.06.2014–04.06.2014. bifa Umweltinstitut GmbH, Augsburg. 24 Folien.

Wang, Teng-Yu; Hsiao, Jui-Chung und Du, Chen-Hsun. 2012. *Recycling of Materials from Silicon Base Solar Cell Module.* 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC); Austin, Texas, USA; 03.06.–08.06.2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Seite 002355-002358. ISBN: 978-1-4673-0064-3.

Weckend, Stephanie; Wade, Andreas und Heath, Garvin. 2016. *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels.* International Renewable Energy Agency (IRENA) and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems (IEA-PVPS), IEA-PVPS Report Number: T12-06:2016. 100 Seiten. ISBN: 978-92-95111-99-8 (PDF, IRENA).

Wellens, Kurt. 2014. *An introduction to the WEEE Directive 2012/19/EU: Challenges for producers of Photovoltaic panels.* Intersolar Europe 2014, ICM München, 02.06.2014 – 04.06.2014. Ernst & Young Global limited. 19 Folien.

Weyhe, Reiner. 2014. *Enhanced Recovery Technologies for critical raw materials.* IEA-PVPS Task 12 Open Workshop, Amsterdam, 23. September 2014. IEA Photovoltaic Power Systems Programme. 19 Folien.

Wippich, Stefan und Fiedler, Frank. 2015. SecondSol GmbH. *Schriftliche Mitteilung*. 18. November 2015, Leipzig.

Kapitel 6

Behrendt, Siegfried; Erdmann, Lorenz; Marwede, Max und Caporal, Sophie. 2010. *Roadmap: Ressourceneffiziente Photovoltaik 2020+*. Wuppertal, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Ressourceneffizienz Paper 9.1, Arbeitspaket 9 des Projekts: Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRess). 152 Seiten.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). 2012. *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess): Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen – Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.2.2012.* Berlin, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stand: 14.05.2012, Version 4.0.8. 121 Seiten.

Cellere, Giorgio; Forstner, Hali; Falcon, Tom; Zwegers, Martijn; Bernreuter, Johannes; Xing, Guoqiang; Haase, Josef; Jooss, Wolfgang; Antoniadis, Homer; Coletti, Gianluca; Meyer, Sylke; Schoenfelder, Stephan; Preu, Ralf; Glatthaar, Markus; Lin, KC; Metz, Axel; Fischer, Markus; Gerlach, Alexander; Lim, Ji Won; Mette, Ansgar; Mette, Michael; Mohr, Andreas; Müller, Jörg; Petter, Kai; Spieß, Thomas; Stassen, Arno; Fuchs, Stefan; Tous, Loic; Rüland, Eric; Richter, André; Burger, Meyer; Li, Chi-Chun; Wang, Kirin; Luan, Andy; Vlasenko, Timur; Buchovskaya, Iryna; Anspach, Oliver; Jooß, Wolfgang; Julsrud, Stein; Rostan, Hannes; Delahaye, Franck; Cho, Jaehwi; Chang, Tony; Raithel, Stephan; Schicht, Thomas; Vedde, Jan; Bartel, Til; Wohlfart, Peter; Yakovlev, Sergey; Neuhaus, Holger; Demenik, Grigory; Luchies, Jan Marc; Pentinga, Rob; Trube, Jutta; Luedemann, Kristin; Liu, Yong; Dornberger, Erich und Westermeier, Christian. 2016. *International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV):2015 Results including maturity reports.* Brüssel, SEMI Europe. ITRPV, Seventh Edition. Oktober 2016. 52 Seiten.

Choi, Jun-Ki und Fthenakis, Vasilis. 2014. *Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives.* Journal of Cleaner Production, Band 66, März 2014, Seite 443-449.

Cucchiella, Federica; D'Adamo, Idiano und Rosa, Paolo. 2015. *End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, Band 47, Juli 2015, Seite 552-561, ISSN 1364-0321.

ENF Ltd. 2016. *Solarmodul-Verzeichnis.* In: https://de.enfsolar.com/pv/panel, abgerufen: 20.06.2016.

Farmer, K. 1998. *Volkswirtschaftlich-ordnungsökonomische Aspekte zwischenbetrieblicher Verwertungsbeziehungen im produzierenden Bereich*. In: Strebel, Heinz und Schwarz, Erich. (Hrsg.). 1998. Kreislauforientierte Unternehmenskooperationen: Stoffstrommanagement durch innovative Verwertungsnetze. Wien, R. Oldenbourg Verlag. Seite 165-198.

Fthenakis, V. M. und Moskowitz P.D. 1999. *The Value and Feasibility of Proactive Recycling.* American Institute of Physics (AIP) Conference Proceedings, National Center for Photovoltaics (NCPV), Denver, USA, 09.09.-11.09.1998. Melville. Seite 332-340. DOI: 10.1063/1.57908.

Fthenakis, Vasilis. 2000. *End-of Life Management and Recycling of PV Modules.* Energy Policy, Band 28, 2000. Seite 1051-1058.

Green, Martin A. 2012. *High-Efficiency Silicon Solar Cell Concepts.* In: McEvoy, A., Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2012. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. second edition: Academic Press. Elsevier Ltd., 2012. 1244 Seiten, ISBN: 978-0-12-385934-1. Seite 99-128.

Green, Martin A. 2012. *High-Efficiency Silicon Solar Cell Concepts.* In: McEvoy, A., Markvart, T. und Castaäner, Luis. 2012. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. Second edition. Oxford, UK, Academic Press, Elsevier Ltd. 1244 Seiten, ISBN: 978-0-12-385934-1. Seite 99-128.

Haas, Hans-Dieter und Schlesinger, Dieter Matthew. 2007. *Umweltökonomie und Ressourcenmanagement.* Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft (WBG). 160 Seiten. ISBN: 978-3-534-20029-0.

Kuehnle , Elke. 2014. *Solarmodulrecycling – Hochwertiges Modulrecycling geht weit über die WEEE-Richtlinien-Vorgaben hinaus.* Sonnenenergie, Heft 1/2014. Seite 28-31.

Mankiw, Gregory N. 2004. *Grundzüge der Volkswirtschaftslehre.* 3. überarbeitete Auflage. Stuttgart, Schäffer-Poeschel Verlag Stuttgart. 911 Seiten. ISBN: 3-7910-2163-X.

Meyer, Jörn-Axel. 1999. *Regionalmarketing: Grundlagen, Konzepte, Anwendung.* München, Verlag Franz Vahlen GmbH. 243 Seiten. ISBN: 3-8006-2499-0.

Möller, Klaus. 2006. *Wertschöpfung in Netzwerken.* München, Verlag Franz Vahlen München. 271 Seiten. ISBN: 3-8006-3326-4.

Posch, Alfred. 2006. *Zwischenbetriebliche Rückstandsverwertung - Kooperationen für eine nachhaltige Entwicklung am Beispiel industrieller Verwertungsnetze.* 1. Auflage, Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH. 352 Seiten. ISBN: 978-3-8350-0204-3.

Rat für nachhaltige Entwicklung. 2011. *Wie Deutschland zum Rohstoffland wird: Empfehlungen des Rates für nachhaltige Entwicklung an die Bundesregierung.* Berlin, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Texte Nr. 39, Juni 2011. 44 Seiten.

Rubin, Leonid. 2010. *Crystalline silicon solar cells and modules.* In: Fraas, Lewis und Partain, Larry. 2010. Solar Cells and their applications. Second edition. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN: 978-0-470-44633-1. Seite 113-136.

Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr (SMWA). 2012. *Rohstoffstrategie für Sachsen: Rohstoffwirtschaft – eine Chance für den Freistaat Sachsen.* Dresden, Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, Referat 46, Bergbau, Umweltfragen. September 2012. 52 Seiten.

Sander, Knut; Schilling, Stephanie; Wambach, Kartsen; Schlenker, Sylke; Müller, Anja; Springer, Johann; Fouquet, Dörte; Jelitte, Andrea; Stryi-Hipp, Gerhard und Chrometzka, Thomas. 2007. *Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystem für photovoltaische Produkte.* Hamburg, Ökopol GmbH, November 2007. Gefördert durch das BMU: Förderkennzeichen 03MAP092. 199 Seiten.

Schwarz, Erich J. 1998. *Ökonomische Aspekte regionaler Verwertungsnetze.* In: Strebel, Heinz und Schwarz, Erich. (Hrsg.). 1998. Kreislauforientierte Unternehmenskooperationen: Stoffstrommanagement durch innovative Verwertungsnetze. Wien, R. Oldenbourg Verlag. Seite 11-26. ISBN: 3-486-24493-0.

Sterr, Thomas. 2003. *Industrielle Stoffkreislaufwirtschaft im regionalen Kontext - Betriebswirtschaftlich-ökologische und geographische Betrachtungen in Theorie und Praxis.* Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 564 Seiten. ISBN: 3-540-43939-0.

Strebel, Heinz und Schwarz, Erich. (Hrsg.). 1998. *Kreislauforientierte Unternehmenskooperationen: Stoffstrommanagement durch innovative Verwertungsnetze.* Wien, R. Oldenbourg Verlag. 341 Seiten. ISBN: 3-486-24493-0.

Weckend, Stephanie; Wade, Andreas und Heath, Garvin. 2016. *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels.* International Renewable Energy Agency (IRENA) and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems (IEA-PVPS), IEA-PVPS Report Number: T12-06:2016. 100 Seiten. ISBN: 978-92-95111-99-8 (PDF, IRENA).

Wurpts, Klaus. 2009. *Dresden, Sachsen, Mitteldeutschland – Regionale Kooperation als Wettbewerbsvorteil.* In: http://www.ebn24.com/klaus-wurpts-m-a-dresden-sachsen-mitteldeutschland-regionale-kooperation-als-wettbewerbsvorteil, abgerufen: 05.08.2017.

ANHANG

Anhangsverzeichnis

Anhang 2-1: Einzelwerte und Formel der Bandabstände ΔE_G in eV in Abhängigkeit der Temperatur für die Halbleiter Germanium, Silizium und Galliumarsenid entsprechend Abbildung 2-5.....732

Anhang 2-2: Ausgewählte Bereiche des Spektrums elektromagnetischer Strahlung.....733

Anhang 4-1: Tabellarische Übersicht der Markdaten der jährlichen Neuinstallationen in Deutschland für den Zeitraum von 1990 bis 2013 inklusive der absoluten und relativen Standardabweichungen (farbliche Markierungen analog Abbildung 4-7).....734

Anhang 4-2: Tabellarische Übersicht der Markdaten der kumulierten Kapazitäten in Deutschland für den Zeitraum von 1990 bis 2013 inklusive der absoluten und relativen Standardabweichungen (farbliche Markierungen analog Abbildung 4-8) sowie eine vergleichende Angabe der aus den Durchschnittsdaten der Anhang 4-1 berechneten kumulierten Sollmenge und deren Abweichung.....735

Anhang 4-3: Erreichte Effizienzen von Laborzellen nach [NREL 2014] mit Stand 2014. 736

Anhang 4-4: Einzelprozessrohdaten der MGS-Raffination.....737

Anhang 4-5: Einzelprozessrohdaten der Produktion von polykristallinem SGS mittels des modifizierten Siemensverfahrens. 738

Anhang 4-6: Einzelprozessrohdaten der Herstellung monokristalliner SGS-Ingots.....739

Anhang 4-7: Einzelprozessrohdaten der Herstellung multikristalliner SGS-Ingots 739

Anhang 4-8: Einzelprozessrohdaten der Fertigung kristalliner Siliziumsolarrohwafer.....740

Anhang 4-9: Einzelprozessrohdaten der Produktion kristalliner Standardsiliziumsolarzellen. 741

Anhang 4-10: Einzelprozessrohdaten der Produktion kristalliner Standardsiliziumsolarmodule 742

Anhang 4-11: Zusammenfassung der separat betrachteten Fertigungsschritte des definierten Standardsolarmoduls auf Basis der kristallinen Siliziumsolartechnologie inklusive Verweis zum jeweils behandelnden Kapitel.....743

Anhang 5-1: Tabellarische Zusammenfassung aller im Kapitel 5.2.1.2 aufgeführten Defekte, geordnet nach Detektionsmethode.....745

Anhang 5-2: Tabellarische Zusammenfassung aller in Abbildung 5-17 aufgeführten Werte inklusive farblicher Zuordnung nach der entsprechenden Abbildungslegende. 748

Anhang 5-3: Tabellarische Zusammenfassung der in Kapitel 5.2.2.4 berechneten und in Abbildung 5-18 dargestellten Prognosewerte und der zugrunde liegenden technologiebereinigten Neuinstallationen für die Beispielregionen Sachsen samt deutschseitiger Anrainer, Ostdeutsches PV-Produktionscluster sowie den Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld Wolfen. Die farbliche Zuordnung erfolgt nach der entsprechenden Abbildungslegende. 750

Anhang 5-4: Tabellarische Zusammenfassung der in Kapitel 5.2.2.4 berechneten und in Abbildung 5-19 dargestellten Prognosewerte und der zugrunde liegenden technologiebereinigten Neuinstallationen für die Bundesländer Sachsen und Thüringen. Die farbliche Zuordnung erfolgt in Anlehnung an die entsprechende Abbildungslegende. 752

Anhang 5-5: Tabellarische Zusammenfassung der nach Kapitel 5.4.3.2 berechneten und in Abbildung 5-29 zusammengefassten einzelnen Transportleistungen in Tonnenkilometer. 753

Anhang 5-6: Tabellarische Zusammenfassung der nach Kapitel 5.4.3.2 berechneten und in Abbildung 5-32 zusammengefassten Kosten in € für inklusive der Angabe über die Anzahl der Fahrten mit der zulässigen Nutzlast N_i 754

Anhang 5-7: Entfernungsmatrix der Knotenmenge b nach Kapitel 5.4.5.2. 755

Anhang 5-8: Einzelne Kapitalwerte in € für alle betrachtungsrelevanten Kalkulationszinsätze und Investitionssummen des Szenarios kurzfristiger K_{rf}-Wert nach Kapitel 5.4.5.3: Nettogegenwartswert, S. 600. 756

Anhang 5-9: Einzelne Kapitalwerte in € für alle betrachtungsrelevanten Kalkulationszinsätze und Investitionssummen des Szenarios K_{rf}-Wert im offenen Geltungsbereich nach Kapitel 5.4.5.3: Nettogegenwartswert, S. 602. 758

Anhang 5-10: Einzelne Kapitalwerte in € für alle betrachtungsrelevanten Kalkulationszinsätze und Investitionssummen des Szenarios $K_{rf,m}$-Wert im geschlossenen Geltungsbereich nach Kapitel 5.4.5.3: Nettogegenwartswert, S.602. 760

Anhang 6-1: Kumulierte Sekundärrohstoffpotenziale für den Zeitraum zwischen 2020 und 2050 für die Region Sachsen samt deutschseitiger Anrainer inklusive Berlin für die Fälle eines Recyclings zur Verwendung und eines Recyclings zur Verwertung 762

Anhang 6-2: Kumulierte Sekundärrohstoffpotenziale für den Zeitraum zwischen 2020 und 2050 für die definierte Region des ostdeutschen PV-Produktionsclusters für die Fälle eines Recyclings zur Verwendung und eines Recyclings zur Verwertung 763

Anhang 6-3: Kumulierte Sekundärrohstoffpotenziale für den Zeitraum zwischen 2020 und 2050 für den Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen für die Fälle eines Recyclings zur Verwendung und eines Recyclings zur Verwertung 764

Anhang 2-1: Einzelwerte und Formel der Bandabstände ΔE_G in eV in Abhängigkeit der Temperatur für die Halbleiter Germanium, Silizium und Galliumarsenid entsprechend Abbildung 2-5.

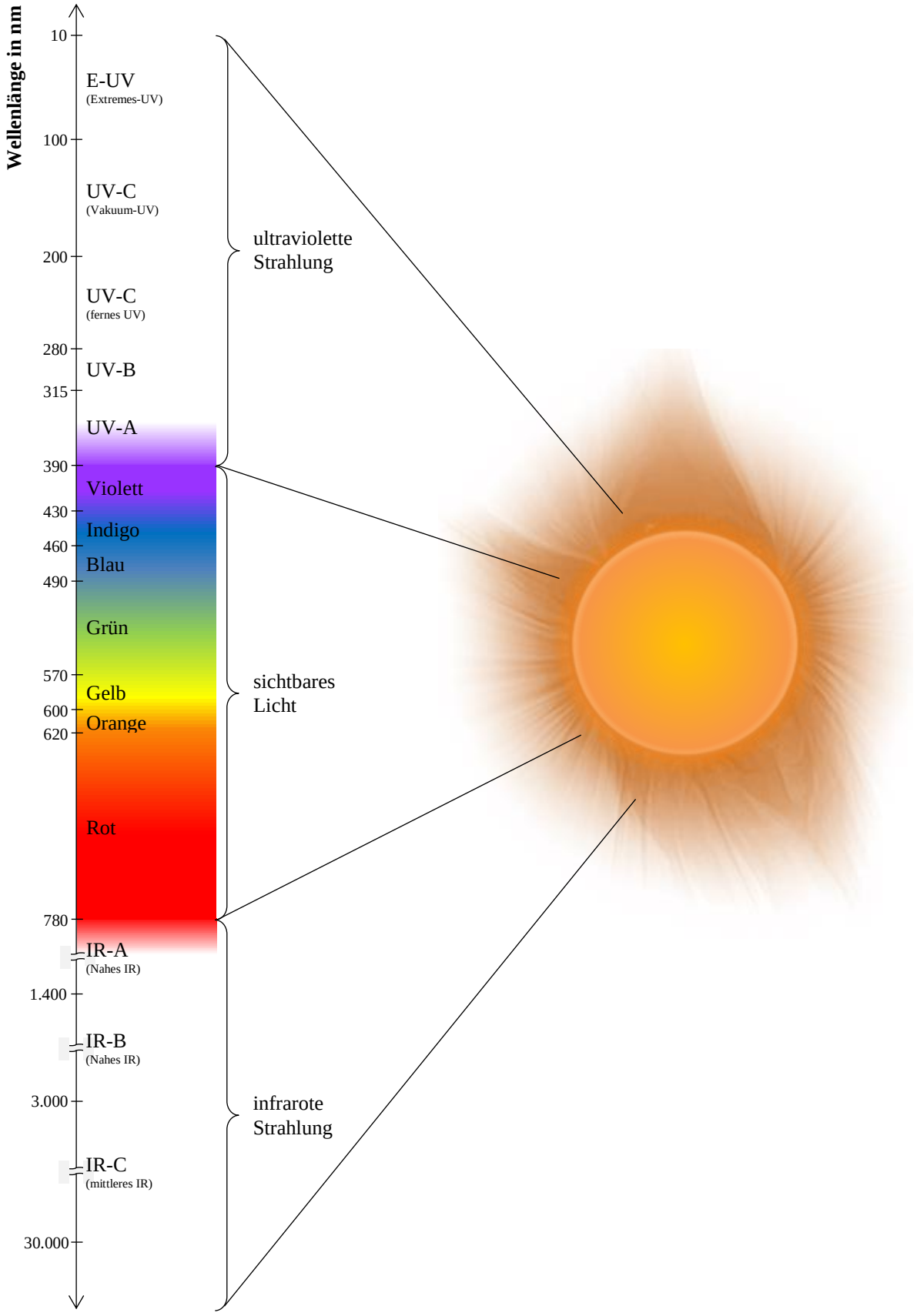
	Bandabstand ΔE_G in eV				Bandabstand ΔE_G in eV		
Temp. [K]	**Germanium**	**Silizium**	**Gallium-arsenid**	**Temp. [K]**	**Germanium**	**Silizium**	**Gallium-arsenid**
0	0,7437	1,1700	1,5190	**410**	0,6193	1,0940	1,3710
10	0,7435	1,1699	1,5187	**420**	0,6151	1,0910	1,3662
20	0,7430	1,1697	1,5180	**430**	0,6110	1,0880	1,3614
30	0,7421	1,1694	1,5169	**440**	0,6068	1,0849	1,3565
40	0,7409	1,1689	1,5155	**450**	0,6026	1,0818	1,3516
50	0,7395	1,1683	1,5137	**460**	0,5984	1,0787	1,3468
60	0,7379	1,1676	1,5116	**470**	0,5941	1,0755	1,3419
70	0,7360	1,1667	1,5093	**480**	0,5899	1,0723	1,3369
80	0,7340	1,1658	1,5068	**490**	0,5856	1,0691	1,3320
90	0,7318	1,1647	1,5041	**500**	0,5813	1,0659	1,3271
100	0,7294	1,1636	1,5012	**510**	0,5770	1,0626	1,3221
110	0,7270	1,1623	1,4982	**520**	0,5727	1,0594	1,3171
120	0,7243	1,1610	1,4950	**530**	0,5684	1,0561	1,3122
130	0,7216	1,1596	1,4917	**540**	0,5641	1,0527	1,3072
140	0,7187	1,1581	1,4882	**550**	0,5597	1,0494	1,3022
150	0,7158	1,1565	1,4846	**560**	0,5554	1,0460	1,2971
160	0,7128	1,1548	1,4810	**570**	0,5510	1,0426	1,2921
170	0,7096	1,1530	1,4772	**580**	0,5466	1,0391	1,2871
180	0,7064	1,1512	1,4734	**590**	0,5423	1,0357	1,2820
190	0,7031	1,1493	1,4695	**600**	0,5379	1,0322	1,2770
200	0,6998	1,1474	1,4655	**610**	0,5335	1,0287	1,2719
210	0,6964	1,1453	1,4614	**620**	0,5291	1,0252	1,2669
220	0,6929	1,1433	1,4573	**630**	0,5246	1,0217	1,2618
230	0,6894	1,1411	1,4531	**640**	0,5202	1,0182	1,2567
240	0,6858	1,1389	1,4489	**650**	0,5158	1,0146	1,2516
250	0,6822	1,1366	1,4446	**660**	0,5113	1,0110	1,2465
260	0,6785	1,1343	1,4403	**670**	0,5069	1,0074	1,2414
270	0,6748	1,1319	1,4359	**680**	0,5024	1,0038	1,2363
280	0,6710	1,1295	1,4314	**690**	0,4980	1,0002	1,2312
290	0,6672	1,1270	1,4270	**700**	0,4935	0,9965	1,2260
300	0,6634	1,1245	1,4225	**710**	0,4890	0,9929	1,2209
310	0,6595	1,1220	1,4179	**720**	0,4846	0,9892	1,2158
320	0,6556	1,1193	1,4134	**730**	0,4801	0,9855	1,2106
330	0,6517	1,1167	1,4088	**740**	0,4756	0,9818	1,2055
340	0,6477	1,1140	1,4041	**750**	0,4711	0,9780	1,2003
350	0,6437	1,1112	1,3995	**760**	0,4666	0,9743	1,1951
360	0,6397	1,1085	1,3948	**770**	0,4621	0,9705	1,1900
370	0,6357	1,1056	1,3901	**780**	0,4575	0,9668	1,1848
380	0,6316	1,1028	1,3854	**790**	0,4530	0,9630	1,1796
390	0,6275	1,0999	1,3806	**800**	0,4485	0,9592	1,1745
400	0,6234	1,0969	1,3758	**810**	0,4440	0,9554	1,1693

Berechnungsformel:

$$\Delta E_G(T) = E_G(0) - \frac{\propto * T^2}{(T + \beta)}$$ **Formel A-1**

	Germanium	**Silizium**	**Galliumarsenid**
$E_G(0)$	0,7437	1,170	1,519
α [10^{-4}]	4,774	4,730	5,405
β	235	636	204

Anhang 2-2: Ausgewählte Bereiche des Spektrums elektromagnetischer Strahlung. Daten nach [Becker *et al.* 2000].



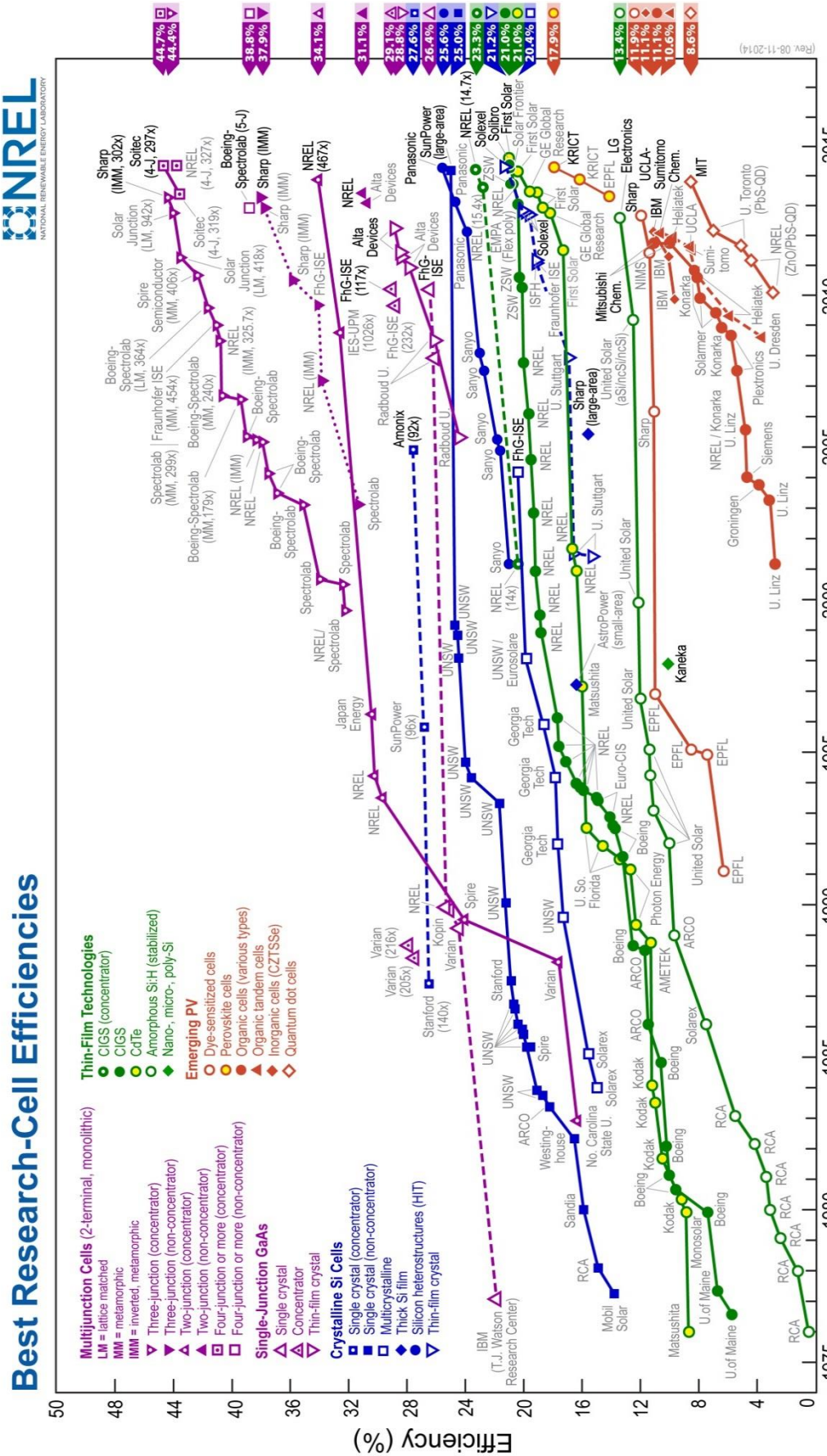
Anhang 4-1: Tabellarische Übersicht der Markdaten der jährlichen Neuinstallationen in Deutschland für den Zeitraum von 1990 bis 2013 inklusive der absoluten und relativen Standardabweichungen (farbliche Markierungen analog Abbildung 4-7)

Angaben in MW_p		Quelle									Durchschnitt	Standard-abweichung	
		Sander *et al.* 2004	Proteus 2014	BSW-Solar 2014b	IEA 2013	Wissing 2012	BMWi 2014b	Nitsch *et al.* 2012	Kübler 2013	BNA 2014		absolut	relativ [%]
Jahr	**1990**	0,59					2				**1,3**	0,7	54,4
	1991	1,01			1,4		0		1,4		**1,0**	0,6	60,1
	1992	3,1			0,9		4		1		**2,3**	1,3	59,5
	1993	3,28			1,4		3		2		**2,4**	0,8	31,3
	1994	3,54			1,4		3		1		**2,2**	1,1	47,5
	1995	5,35			1		6		2		**3,6**	2,1	59,4
	1996	10,1			3,6		10		3		**6,7**	3,4	50,7
	1997	14			6,2		14		7		**10,3**	3,7	36,0
	1998	12			5,4		12		5		**8,6**	3,4	39,6
	1999	15,6			8,3		16		9		**12,2**	3,6	29,3
	2000	44,3		45	59,2		44		44		**47,3**	6,0	12,6
	2001	80,9		115	117,2	112	62	110	110		**101,0**	19,5	19,3
	2002			113	117	114	120	110	110		**114,0**	3,6	3,2
	2003			147	149,4	142	139	143	139		**143,2**	3,9	2,7
	2004			660	666,4	673	670	635	670		**662,4**	12,9	1,9
	2005			930	932,2	954	951	906	951		**937,4**	16,9	1,8
	2006			850	846,8	846	843	832	843		**843,5**	5,7	0,7
	2007			1.270	1.276,7	1.274	1.271	1.165	1.271		**1.254,6**	40,1	3,2
	2008			1.940	1.958	1.955	1.950	1.900	1.950		**1.942,2**	19,7	1,0
	2009		3.801,6	3.800	3.805,9	3.799	4.446	4.037	4.446	3.801,6	**3.992,1**	272,8	6,8
	2010		7.377,7	7.400	7.413,2	7.411	6.988	7.406	6.988	7.377,7	**7.295,2**	177,8	2,4
	2011		7.485,2	7.500	7.485,3	7.450	7.485	7.500	7.485	7.485,2	**7.484,5**	14,5	0,2
	2012		7.604,1	7.600	7.604,1		7.604		7.624	7.064,1	**7.606,7**	7,9	0,1
	2013		3.303,8	3.300			3.305				**3.302,9**	2,1	0,1

Anhang 4-2: Tabellarische Übersicht der Markdaten der kumulierten Kapazitäten in Deutschland für den Zeitraum von 1990 bis 2013 inklusive der absoluten und relativen Standardabweichungen (farbliche Markierungen analog Abbildung 4-8) sowie eine vergleichende Angabe der aus den Durchschnittsdaten der Anhang 4-1 berechneten kumulierten Sollmenge und deren Abweichung.

Angaben in MW_p	Quelle					Durchschnitt	Standard-abweichung		Berechneter Sollwert nach Anhang 4-1	Standard-abweichung	
Jahr	IEA 2013	Wissing 2012	BMWi 2014b	Nitsch *et al.* 2012	Kübler 2013		absolut	relativ [%]		absolut	relativ [%]
1990	0,6		2		0,6	**1,1**	0,7	61,9	1,3	0,2	21,4
1991	2		2		2	**2,0**	0,0	0,0	2,2	0,2	12,4
1992	2,9		6		3	**4,0**	1,4	36,3	4,5	0,5	13,4
1993	4,3		9		5	**6,1**	2,1	33,9	6,9	0,8	13,4
1994	5,7		12		6	**7,9**	2,9	36,7	9,2	1,3	15,9
1995	6,7		18		8	**10,9**	5,0	46,3	12,7	1,8	16,9
1996	10,3		28		11	**16,4**	8,2	49,8	19,4	3,0	18,1
1997	16,5		42		18	**25,5**	11,7	45,8	29,7	4,2	16,5
1998	21,9		54		23	**33,0**	14,9	45,1	38,3	5,3	16,2
1999	30,2		70		32	**44,1**	18,4	41,6	50,5	6,5	14,7
2000	89,4	90	114	76	76	**89,1**	13,9	15,6	97,8	8,8	9,8
2001	206,6	202	176	186	186	**191,3**	11,3	5,9	198,9	7,5	3,9
2002	323,6	316	296	296	296	**305,5**	11,9	3,9	312,9	7,3	2,4
2003	473	458	435	439	435	**448,0**	15,1	3,4	456,1	8,1	1,8
2004	1.139,4	1.131	1.105	1.074	1.105	**1.110,9**	23,0	2,1	1.118,5	7,6	0,7
2005	2.071,6	2.085	2.056	1.980	2.056	**2.049,7**	36,5	1,8	2.055,9	6,1	0,3
2006	2.918,4	2.931	2.899	2.812	2.899	**2.891,9**	41,8	1,4	2.899,3	7,4	0,3
2007	4.195,1	4.205	4.170	3.977	4.170	**4.143,4**	84,3	2,0	4.153,9	10,5	0,3
2008	6.153,1	6.160	6.120	5.877	6.120	**6.086,0**	105,8	1,7	6.096,1	10,1	0,2
2009	9.959	9.959	10.566	9.914	10.566	**10.192,8**	305,2	3,0	10.088	104,6	1,0
2010	17.372,2	17.370	17.554	17.320	17.554	**17.434,0**	99,7	0,6	17.383	50,6	0,3
2011	24.857,5	24.820	25.039	24.820	25.039	**24.915,1**	102,1	0,4	24.868	47,2	0,2
2012	32.461,6		32.643		32.663	**32.589,2**	90,6	0,3	32.475	114,6	0,4
2013			35.948			**35.948,0**	0,0	0,0	35.778	170,4	0,5

Anhang 4-3: Erreichte Effizienzen von Laborzellen nach [NREL 2014] mit Stand 2014.



Anhang 4-4: Einzelprozessrohdaten der MGS-Raffination. Daten aus [Jungbluth *et al.* 2012, S. 24]

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	MG-silicon, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95	GeneralComment
	Location				NO			
	InfrastructureProcess				0			
	Unit				kg			
product	MG-silicon, at plant	NO	0	kg	1.00E+0			
technosphere	electricity, medium voltage, at grid	NO	0	kWh	1.10E+1	1	1.10	(2,2,2,1,1,3); Literature, lower range to account for heat recovery
	wood chips, mixed, u=120%, at forest	RER	0	m3	3.25E-3	1	1.10	(2,2,2,1,1,3); Literature, 1.35 kg
	hard coal coke, at plant	RER	0	MJ	2.31E+1	1	1.10	(2,2,2,1,1,3); Literature, coal
	graphite, at plant	RER	0	kg	1.00E-1	1	1.10	(2,2,2,1,1,3); Literature, graphite electrodes
	charcoal, at plant	GLO	0	kg	1.70E-1	1	1.10	(2,2,2,1,1,3); Literature
	petroleum coke, at refinery	RER	0	kg	5.00E-1	1	1.10	(2,2,2,1,1,3); Literature
	silica sand, at plant	DE	0	kg	2.70E+0	1	1.10	(2,2,2,1,1,3); Literature
	oxygen, liquid, at plant	RER	0	kg	2.00E-2	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); Literature
	disposal, slag from MG silicon production, 0% water, to inert material landfill	CH	0	kg	2.50E-2	1	1.10	(2,2,2,1,1,3); Literature
	silicone plant	RER	1	unit	1.00E-11	1	3.05	(1,2,2,1,3,3); Estimation
	transport, transoceanic freight ship	OCE	0	tkm	2.55E+0	1	2.10	(4,5,na,na,na,na); Charcoal from Asia 15000km
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	1.56E-1	1	2.10	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 50km, 20km for sand
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	6.90E-2	1	2.10	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 100km
emission air, low population density	Heat, waste	-	-	MJ	7.13E+1	1	1.10	(2,2,2,1,1,3); Calculation based on fuel and electricity use minus 25 MJ/kg
	Arsenic	-	-	kg	9.42E-9	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	Aluminum	-	-	kg	1.55E-6	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	Antimony	-	-	kg	7.85E-9	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	Boron	-	-	kg	2.79E-7	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	Cadmium	-	-	kg	3.14E-10	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	Calcium	-	-	kg	7.75E-7	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	Carbon monoxide, biogenic	-	-	kg	6.20E-4	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature
	Carbon monoxide, fossil	-	-	kg	1.38E-3	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature
	Carbon dioxide, biogenic	-	-	kg	1.61E+0	1	1.10	(2,2,2,1,1,3); Calculation, biogenic fuels
	Carbon dioxide, fossil	-	-	kg	3.58E+0	1	1.10	(2,2,2,1,1,3); Calculation, fossil fuels
	Chromium	-	-	kg	7.85E-9	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	Chlorine	-	-	kg	7.85E-8	1	1.61	(3,4,3,3,1,5); Literature
	Cyanide	-	-	kg	6.87E-6	1	1.61	(3,4,3,3,1,5); Estimation
	Fluorine	-	-	kg	3.88E-8	1	1.61	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	Hydrogen sulfide	-	-	kg	5.00E-4	1	1.61	(3,4,3,3,1,5); Estimation
	Hydrogen fluoride	-	-	kg	5.00E-4	1	1.61	(3,4,3,3,1,5); Estimation
	Iron	-	-	kg	3.88E-6	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	Lead	-	-	kg	3.44E-7	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	Mercury	-	-	kg	7.85E-9	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	-	-	kg	9.60E-5	1	1.61	(3,4,3,3,1,5); Literature
	Nitrogen oxides	-	-	kg	9.74E-3	1	1.52	(3,2,2,1,1,3); Calculation based on environmental report
	Particulates, > 10 um	-	-	kg	7.75E-3	1	1.52	(3,2,2,1,1,3); Calculation based on environmental report
	Potassium	-	-	kg	6.20E-5	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	Silicon	-	-	kg	7.51E-3	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, SiO2 in dust
	Sodium	-	-	kg	7.75E-7	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust
	Sulfur dioxide	-	-	kg	1.22E-2	1	1.13	(3,2,2,1,1,3); Calculation based on environmental report
	Tin	-	-	kg	7.85E-9	1	5.10	(3,4,3,3,1,5); Literature, in dust

Anhang 4-5: Einzelprozessrohdaten der Produktion von polykristallinem SGS mittels des modifizierten Siemensverfahrens. Daten aus [Jungbluth *et al.* 2012, S. 39]

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant	silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment
	Location				CN	RER			
	InfrastructureProcess				0	0			
	Unit				kg	kg			
product	silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant	RER	0	kg	0	1.00E+0			
product	silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant	CN	0	kg	1.00E+0	0			
technosphere	MG-silicon, at plant	NO	0	kg	0	1.13E+0	1	1.15	(2,3,1,2,1,3); Literature
technosphere	MG-silicon, at plant	CN	0	kg	1.13E+0				
	hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	RER	0	kg	1.60E+0	1.60E+0	1	1.20	(3,3,1,2,1,3); de Wild 2007, share of NaOH, HCl and H2 estimated with EG-Si data
	hydrogen, liquid, at plant	RER	0	kg	5.01E-2	5.01E-2	1	1.20	(3,3,1,2,1,3); de Wild 2007, share of NaOH, HCl and H2 estimated with EG-Si data
	sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	RER	0	kg	3.48E-1	3.48E-1	1	1.20	(3,3,1,2,1,3); de Wild 2007, share of NaOH, HCl and H2 estimated with EG-Si data
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	2.66E+0	2.66E+0	1	2.85	(4,5,na,na,na,na); Distance 2000km plus 100 km for chemicals
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	2.40E+0	2.40E+0	1	2.85	(4,5,na,na,na,na); 600km for chemicals including solvent
	transport, transoceanic freight ship	OCE	0	tkm	0	5.30E+0	1	2.77	(2,3,2,2,3,2); Transport of REC silicon from US to European market
	electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	RER	0	kWh	0	3.58E+1	1	1.15	(2,3,1,2,1,3); on-site plant of Wacker in Germany
	electricity, hydropower, at run-of-river power plant	RER	0	kWh	0	6.17E+1	1	1.15	(2,3,1,2,1,3); production of REC and of Wacker's hydropower plant
	electricity, medium voltage, at grid	FI	0	kWh	0	1.25E+1	1	1.15	(2,3,1,2,1,3); production of Elkem in Finland
	electricity, medium voltage, at grid	CN	0	kWh	1.10E+2	-			
	heat, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	RER	0	MJ	1.85E+2	1.85E+2	1	1.15	(2,3,1,2,1,3); literature, for process heat
	silicone plant	RER	1	unit	1.00E-11	1.00E-11	1	4.85	(1,3,1,2,3,3); Estimation
emission air	Heat, waste	-	-	MJ	3.51E+2	3.51E+2	1	1.15	(2,3,1,2,1,3); Calculation
emission water, river	AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	-	-	kg	1.26E-5	1.26E-5	1	1.56	(1,2,1,1,3,3); Environmental report 2002, average Si product
	BOD5, Biological Oxygen Demand	-	-	kg	2.05E-4	2.05E-4	1	1.56	(1,2,1,1,3,3); Environmental report 2002, average Si product
	COD, Chemical Oxygen Demand	-	-	kg	2.02E-3	2.02E-3	1	1.56	(1,2,1,1,3,3); Environmental report 2002, average Si product
	Chloride	-	-	kg	3.60E-2	3.60E-2	1	3.05	(1,2,1,1,3,3); Environmental report 2002, average Si product
	Copper, ion	-	-	kg	1.02E-7	1.02E-7	1	5.06	(1,2,1,1,3,3); Environmental report 2002, average Si product
	Nitrogen	-	-	kg	2.08E-4	2.08E-4	1	1.56	(1,2,1,1,3,3); Environmental report 2002, average Si product
	Phosphate	-	-	kg	2.80E-6	2.80E-6	1	1.56	(1,2,1,1,3,3); Environmental report 2002, average Si product
	Sodium, ion	-	-	kg	3.38E-2	3.38E-2	1	1.56	(1,2,1,1,3,3); Environmental report 2002, average Si product
	Zinc, ion	-	-	kg	1.96E-6	1.96E-6	1	5.06	(1,2,1,1,3,3); Environmental report 2002, average Si product
	Iron, ion	-	-	kg	5.61E-6	5.61E-6	1	5.06	(1,2,1,1,3,3); Environmental report 2002, average Si product
	DOC, Dissolved Organic Carbon	-	-	kg	9.10E-4	9.10E-4	1	1.58	(3,na,na,3,1,5); Extrapolation for sum parameter
	TOC, Total Organic Carbon	-	-	kg	9.10E-4	9.10E-4	1	1.56	(1,2,1,1,3,3); Environmental report 2002, average Si product

Anhang 4-6: Einzelprozessrohdaten der Herstellung monokristalliner SGS-Ingots. Daten aus [Jungbluth *et al.* 2012, S. 45]

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	CZ single crystalline silicon, electronics, at plant	uncertainty	StandardDeviation95%	GeneralComment	CZ single crystalline silicon, photovoltaics, at plant	UncertaintyT	StandardDeviation95%	GeneralComment
	Location				RER				RER			
	InfrastructureProcess				0				0			
	Unit				kg				kg			
product	CZ single crystalline silicon, electronics, at plant	RER	0	kg	1.00E+0				0			
	CZ single crystalline silicon, photovoltaics, at plant	RER	0	kg	0				1.00E+0			
resource, in water	Water, cooling, unspecified natural origin	-	-	m3	2.33E+0	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker 2006	2.33E+0	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker 2006
	Water, river	-	-	m3	2.05E+0	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker 2006	2.05E+0	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker 2006
technosphere	electricity, medium voltage, production UCTE, at grid	UCTE	0	kWh	2.00E+2	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker 2006	8.56E+1	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); de Wild 2007
	natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW	RER	0	MJ	2.70E+2	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker 2006	6.82E+1	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); de Wild 2007
water	tap water, at user	RER	0	kg	9.41E+1	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker 2006	9.41E+1	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker 2006
	silicon, electronic grade, at plant	DE	0	kg	1.43E+0	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker 2006	-	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker 2000
	silicon, production mix, photovoltaics, at plant	GLO	0	kg	-	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker 2006	1.07E+0	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); de Wild 2007
materials	argon, liquid, at plant	RER	0	kg	5.79E+0	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); de Wild 2007, protection gas for crystal growing	5.79E+0	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); de Wild 2007, protection gas for crystal growing
	hydrogen fluoride, at plant	GLO	0	kg	5.07E-2	1	1.36	(3,4,3,3,3,5); For etching, Hagedorn 1992	5.07E-2	1	1.36	(3,4,3,3,3,5); For etching, Hagedorn 1992
	nitric acid, 50% in H2O, at plant	RER	0	kg	9.47E-2	1	1.36	(3,4,3,3,3,5); For etching, Hagedorn 1992	9.47E-2	1	1.36	(3,4,3,3,3,5); For etching, Hagedorn 1992
	acetic acid, 98% in H2O, at plant	RER	0	kg	1.08E-1	1	1.36	(3,4,3,3,3,5); For etching, Hagedorn 1992	1.08E-1	1	1.36	(3,4,3,3,3,5); For etching, Hagedorn 1992
	acetone, liquid, at plant	RER	0	kg	4.90E-2	1	1.36	(3,4,3,3,3,5); For etching, Hagedorn 1992	4.90E-2	1	1.36	(3,4,3,3,3,5); For etching, Hagedorn 1992
	sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	RER	0	kg	4.15E-2	1	1.36	(3,4,3,3,3,5); waste gas neutralization, Hagedorn 1992	4.15E-2	1	1.36	(3,4,3,3,3,5); waste gas neutralization, Hagedorn 1992
	ceramic tiles, at regional storage	CH	0	kg	3.36E-1	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); de Wild 2007, quartz crucible for melting the silicon	3.36E-1	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); de Wild 2007, quartz crucible for melting the silicon
	lime, hydrated, packed, at plant	CH	0	kg	1.91E-1	1	1.36	(3,4,3,3,3,5); waste water treatment, Hagedorn 1992	1.91E-1	1	1.36	(3,4,3,3,3,5); waste water treatment, Hagedorn 1992
transport	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	2.10E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 100km, sand 50km, silicon 1000km	1.74E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 100km, sand 50km, silicon 1000km
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	4.00E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 600km	4.00E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 600km
infrastructure	silicone plant	RER	1	unit	1.00E-11	1	3.05	(1,2,1,1,3,3); Estimation	1.00E-11	1	3.05	(1,2,1,1,3,3); Estimation
	disposal, waste, Si waferprod., inorg, 9.4% water, to residual material landfill	CH	0	kg	3.64E+0	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker	3.64E+0	1	1.24	(1,4,1,2,1,5); Environmental report Wacker
emission air, high population density	Heat, waste	-	-	MJ	7.20E+2	1	1.25	(3,3,2,3,1,5); Calculation	7.20E+2	1	1.25	(3,3,2,3,1,5); Calculation
emission water, river	Fluoride	-	-	kg	2.37E-3	1	3.08	(3,4,3,3,1,5); Hagedorn 1992, 50% reduction, basic uncertainty = 3	2.37E-3	1	3.08	(3,4,3,3,1,5); Hagedorn 1992, 50% reduction, basic uncertainty = 3
	Hydrocarbons, unspecified	-	-	kg	2.28E-2	1	3.08	(3,4,3,3,1,5); Hagedorn 1992, 50% reduction, basic uncertainty = 3	2.28E-2	1	3.08	(3,4,3,3,1,5); Hagedorn 1992, 50% reduction, basic uncertainty = 3
	Hydroxide	-	-	kg	7.42E-3	1	3.08	(3,4,3,3,1,5); Hagedorn 1992, 50% reduction, basic uncertainty = 3	7.42E-3	1	3.08	(3,4,3,3,1,5); Hagedorn 1992, 50% reduction, basic uncertainty = 3
	Acetic acid	-	-	kg	5.40E-2	1	3.08	(3,4,3,3,1,5); Hagedorn 1992, 50% emission, basic uncertainty = 3	5.40E-2	1	3.08	(3,4,3,3,1,5); Hagedorn 1992, 50% emission, basic uncertainty = 3
	BOD5, Biological Oxygen Demand	-	-	kg	1.30E-1	1	3.08	(5,na,1,1,1,na); Extrapolation for sum parameter	1.30E-1	1	3.23	(5,na,1,1,1,na); Extrapolation for sum parameter
	COD, Chemical Oxygen Demand	-	-	kg	1.30E-1	1	3.08	(5,na,1,1,1,na); Extrapolation for sum parameter	1.30E-1	1	3.23	(5,na,1,1,1,na); Extrapolation for sum parameter
	DOC, Dissolved Organic Carbon	-	-	kg	4.05E-2	1	3.08	(5,na,1,1,1,na); Extrapolation for sum parameter	4.05E-2	1	3.23	(5,na,1,1,1,na); Extrapolation for sum parameter
	TOC, Total Organic Carbon	-	-	kg	4.05E-2	1	3.08	(5,na,1,1,1,na); Extrapolation for sum parameter	4.05E-2	1	3.23	(5,na,1,1,1,na); Extrapolation for sum parameter
	Nitrogen	-	-	kg	9.10E-3	1	1.61	(3,4,3,3,1,5); Environmental report Wacker 2006, 50% of total emissions	9.10E-3	1	1.61	(3,4,3,3,1,5); Environmental report Wacker 2006, 50% of total emissions

Anhang 4-7: Einzelprozessrohdaten der Herstellung multikristalliner SGS-Ingots. Daten aus [Jungbluth *et al.* 2012, S. 47]

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	silicon, multi-Si, casted, at plant	Uncertai	StandardDeviati	GeneralComment
	Location				RER			
	InfrastructureProcess				0			
	Unit				kg			
product	silicon, multi-Si, casted, at plant	RER	0	kg	1.00E+0			
resource, in water	Water, cooling, unspecified natural origin	-	-	m3	5.00E+0	1	1.26	(3,4,2,3,1,5); Nijs 1997
technosphere	electricity, medium voltage, production UCTE, at grid	UCTE	0	kWh	1.93E+1	1	1.07	(1,2,1,1,1,3); Estimation with de Wild 2007
	argon, liquid, at plant	RER	0	kg	2.67E-1	1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for ingot growing
	helium, gaseous, at plant	RER	0	kg	1.19E-4	1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for ingot growing
	nitrogen, liquid, at plant	RER	0	kg	4.67E-2	1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for ingot growing
	ceramic tiles, at regional storage	CH	0	kg	3.42E-1	1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, quarz for ingot growing
	silicon, production mix, photovoltaics, at plant	GLO	0	kg	1.14E+0	1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, total silicon needed minus internally recycled silicon from ingot cut-offs and broken wafers.
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	1.17E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distances 50km, silicon 1000km
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	6.56E-2	1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distances 100km
	silicone plant	RER	1	unit	1.00E-11	1	3.05	(1,2,1,1,3,3); Estimation
emission air	Heat, waste	-	-	MJ	6.95E+1	1	1.25	(3,3,2,3,1,5); Calculation

Anhang 4-8: Einzelprozessrohdaten der Fertigung kristalliner Siliziumsolarrohwafer. Daten aus [Jungbluth *et al.* 2012, S. 54]

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	single-Si wafer, photovoltaics, at plant	single-Si wafer, electronics, at plant	multi-Si wafer, at plant	multi-Si wafer, ribbon, at plant	StandardDeviation95	GeneralComment
	Location				RER	RER	RER	RER		
	InfrastructureProcess				0	0	0	0		
	Unit				m2	m2	m2	m2		
technosphere	electricity, medium voltage, production UCTE, at grid	UCTE	0	kWh	8.00E+0	3.00E+1	8.00E+0	4.23E+1	2.07	(3,4,1,3,1,5); Estimation based on literature data, high range of literature values
	natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW	RER	0	MJ	4.00E+0	4.00E+0	4.00E+0	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for removing adhesive after sawing
water	tap water, at user	RER	0	kg	6.00E-3	6.85E+2	6.00E-3	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007
	water, completely softened, at plant	RER	0	kg	6.50E+1	-	6.50E+1	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for wafer cleaning
material	CZ single crystalline silicon, electronics, at plant	RER	0	kg	-	6.85E-1	-	-	1.07	(1,2,1,1,1,3);
	CZ single crystalline silicon, photovoltaics, at plant	RER	0	kg	6.85E-1	-	-	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); Own calculation with de Wild 2007 data
	silicon, multi-Si, casted, at plant	RER	0	kg	-	-	9.32E-1	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); polycrystalline silicon of semiconductor or solar grade quality. This value is the total silicon needed minus internally recycled silicon from ingot cut-offs and broken wafers.
	silicon, production mix, photovoltaics, at plant	GLO	0	kg	-	-	-	7.40E-1	1.07	(1,2,1,1,1,3); polycrystalline silicon of semiconductor or solar grade quality. This value is the total silicon needed minus internally recycled silicon broken
	silicon carbide, at plant	RER	0	kg	4.90E-1	4.90E-1	4.90E-1	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, SiC use for sawing
	silicon carbide, recycling, at plant	RER	0	kg	2.14E+0	2.14E+0	2.14E+0	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, SiC use for sawing
auxiliary material	graphite, at plant	RER	0	kg	-	-	-	6.60E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, graphite
	argon, liquid, at plant	RER	0	kg	-	5.75E-1	-	5.21E+0	1.26	(3,4,2,3,1,5); Protection gas sawing, de Wild 2007
	sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	RER	0	kg	1.50E-2	1.50E-2	1.50E-2	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for wafer cleaning
	hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	RER	0	kg	2.70E-3	2.70E-3	2.70E-3	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for wafer cleaning
	acetic acid, 98% in H2O, at plant	RER	0	kg	3.90E-2	3.90E-2	3.90E-2	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for wafer cleaning
	nitric acid, 50% in H2O, at plant	RER	0	kg	-	3.70E-1	-	-	1.58	(5,4,1,3,1,5); calculated with NOx emissions, Wacker 2006
	triethylene glycol, at plant	RER	0	kg	1.10E-1	1.10E-1	1.10E-1	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); For sawing slurry, de Wild 2007
	triethylene glycol, recycling, at plant	RER	0	kg	2.60E+0	2.60E+0	2.60E+0	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); For sawing slurry, de Wild 2007
	dipropylene glycol monomethyl ether, at plant	RER	0	kg	3.00E-1	3.00E-1	3.00E-1	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for wafer cleaning
	alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical, at plant	RER	0	kg	2.40E-1	2.40E-1	2.40E-1	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for wafer cleaning
	acrylic binder, 34% in H2O, at plant	RER	0	kg	2.00E-3	2.00E-3	2.00E-3	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, adhesive for temporarily attachment of bricks to wire-sawing equipment
	glass wool mat, at plant	CH	0	kg	1.00E-2	1.00E-2	1.00E-2	-	1.07	(2,2,1,1,1,na); de Wild 2007, for temporarily attachment of bricks to wire sawing equipment
	paper, woodfree, coated, at integrated mill	RER	0	kg	1.90E-1	1.90E-1	1.90E-1	1.90E-1	1.29	(3,4,3,3,1,5); Hagedorn 1992
	polystyrene, high impact, HIPS, at plant	RER	0	kg	2.00E-1	2.00E-1	2.00E-1	2.00E-1	1.34	(4,4,3,3,1,5); estimation packaging
	packaging film, LDPE, at plant	RER	0	kg	1.00E-1	1.00E-1	1.00E-1	1.00E-1	1.34	(4,4,3,3,1,5); estimation packaging
	brass, at plant	CH	0	kg	7.45E-3	7.45E-3	7.45E-3	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, wire saws, high resistance brass-coated steel with carbon content in the range 0.7%-0.9%, 5g/kg brass
	steel, low-alloyed, at plant	RER	0	kg	1.48E+0	1.48E+0	1.48E+0	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, wire saws, high resistance brass-coated steel with carbon content in the range 0.7%-0.9%, 5g/kg brass
	wire drawing, steel	RER	0	kg	1.49E+0	1.49E+0	1.49E+0	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, wire saws
wastes	disposal, waste, silicon wafer production, 0% water, to underground deposit	DE	0	kg	1.10E-1	6.17E-2	1.70E-1	7.00E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, estimate for unused parts of crystal
	disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to sanitary landfill	CH	0	kg	-	1.71E+0	-	-	1.24	(2,4,1,3,1,5); Environmental report Wacker
	disposal, waste, Si waferprod., inorg, 9.4% water, to residual material landfill	CH	0	kg	-	7.26E+0	-	-	1.24	(2,4,1,3,1,5); Environmental report Wacker
transport	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	1.02E+0	1.51E+0	1.06E+0	3.14E-1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance, 200km for silicon input
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	4.13E+0	4.41E+0	4.13E+0	8.19E-1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance
infrastructure	wafer factory	DE	1	unit	4.00E-6	4.00E-6	4.00E-6	4.00E-6	3.00	(1,2,1,1,1,3); Literature
emission air	Heat, waste	-	-	MJ	2.88E+1	1.08E+2	2.88E+1	1.52E+2	1.26	(3,4,1,3,1,5); Calculation
	Nitrogen oxides	-	-	kg	-	3.70E-1	-	-	1.58	(2,4,1,3,1,5); Environmental report Wacker 2006
emission water, river	AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	-	-	kg	5.01E-4	5.01E-4	5.01E-4	5.01E-4	1.58	(2,4,1,3,1,5); Environmental report Wacker 2006, formed by nitric acid use
	Cadmium, ion	-	-	kg	6.05E-6	6.05E-6	6.05E-6	6.05E-6	3.06	(2,4,2,3,1,5); Environmental report Wacker 2000
	Chromium, ion	-	-	kg	3.03E-5	3.03E-5	3.03E-5	3.03E-5	3.06	(2,4,2,3,1,5); Environmental report Wacker 2000
	COD, Chemical Oxygen Demand	-	-	kg	2.96E-2	2.96E-2	2.96E-2	2.96E-2	1.58	(2,4,1,3,1,5); Environmental report Wacker 2000
	Copper, ion	-	-	kg	6.05E-5	6.05E-5	6.05E-5	6.05E-5	3.06	(2,4,2,3,1,5); Environmental report Wacker 2000
	Lead	-	-	kg	3.03E-5	3.03E-5	3.03E-5	3.03E-5	5.07	(2,4,2,3,1,5); Environmental report Wacker 2000
	Mercury	-	-	kg	6.05E-6	6.05E-6	6.05E-6	6.05E-6	5.07	(2,4,2,3,1,5); Environmental report Wacker 2000
	Nickel, ion	-	-	kg	6.05E-5	6.05E-5	6.05E-5	6.05E-5	5.07	(2,4,2,3,1,5); Environmental report Wacker 2000
	Nitrogen	-	-	kg	9.94E-3	9.94E-3	9.94E-3	9.94E-3	1.58	(2,4,1,3,1,5); Environmental report Wacker 2006, 50% of total emissions
	Phosphate	-	-	kg	5.01E-4	5.01E-4	5.01E-4	5.01E-4	1.58	(2,4,1,3,1,5); Environmental report Wacker 2006
	BOD5, Biological Oxygen Demand	-	-	kg	2.96E-2	2.96E-2	2.96E-2	2.96E-2	1.59	(3,4,2,3,1,5); Extrapolation for sum parameter
	DOC, Dissolved Organic Carbon	-	-	kg	1.11E-2	1.11E-2	1.11E-2	1.11E-2	1.59	(3,4,2,3,1,5); Extrapolation for sum parameter
	TOC, Total Organic Carbon	-	-	kg	1.11E-2	1.11E-2	1.11E-2	1.11E-2	1.59	(3,4,2,3,1,5); Extrapolation for sum parameter

Anhang 4-9: Einzelprozessrohdaten der Produktion kristalliner Standardsiliziumsolarzellen. Daten aus [Jungbluth *et al.* 2012, S. 64]

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	photovoltaic cell, single-Si, at plant	photovoltaic cell, multi-Si, at plant	photovoltaic cell, ribbon-Si, at plant	StandardDeviation	GeneralComment
	Location				RER	RER	RER		
	InfrastructureProcess				0	0	0		
	Unit				m2	m2	m2		
resource, in water	Water, cooling, unspecified natural origin	-	-	m3	9.99E-1	9.99E-1	9.99E-1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
technosphere	electricity, medium voltage, production UCTE, at grid	UCTE	0	kWh	3.02E+1	3.02E+1	3.02E+1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW	RER	0	MJ	4.77E+0	4.77E+0	4.77E+0	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating	RER	0	MJ	1.16E+0	1.16E+0	1.16E+0	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
infrastructure	photovoltaic cell factory	DE	1	unit	4.00E-7	4.00E-7	4.00E-7	3.00	(1,2,1,1,1,3); estimation with company data
wafers	single-Si wafer, photovoltaics, at plant	RER	0	m2	1.06E+0	-	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, 6% losses
	multi-Si wafer, at plant	RER	0	m2	-	1.06E+0	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, 6% losses
	multi-Si wafer, ribbon, at plant	RER	0	m2	-	-	1.08E+0	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, 7% losses
materials	metallization paste, front side, at plant	RER	0	kg	7.40E-3	7.40E-3	7.40E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for electric contacts
	metallization paste, back side, at plant	RER	0	kg	4.93E-3	4.93E-3	4.93E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for electric contacts
	metallization paste, back side, aluminium, at plant	RER	0	kg	7.19E-2	7.19E-2	7.19E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for electric contacts
chemicals	ammonia, liquid, at regional storehouse	RER	0	kg	6.74E-3	6.74E-3	6.74E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for de-oxidation
	phosphoric acid, fertiliser grade, 70% in H2O, at plant	GLO	0	kg	7.67E-3	7.67E-3	7.67E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for emitter formation. i.e. Ferro FX99-014: hazardous components 1-5% P2O5, 40-90% organic chemicals.
	phosphoryl chloride, at plant	RER	0	kg	1.59E-3	1.59E-3	1.59E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, POCl3 for emitter formation
	titanium dioxide, production mix, at plant	RER	0	kg	1.42E-6	1.42E-6	1.42E-6	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, tetraisopropyltitanate (TPT, a
	ethanol from ethylene, at plant	RER	0	kg	6.41E-4	6.41E-4	6.41E-4	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for cleaning
	isopropanol, at plant	RER	0	kg	7.89E-2	7.89E-2	7.89E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for cleaning
	solvents, organic, unspecified, at plant	GLO	0	kg	1.43E-3	1.43E-3	1.43E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for cleaning
	silicone product, at plant	RER	0	kg	1.21E-3	1.21E-3	1.21E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, silane (SiH4) for silicon nitride deposition
	sodium silicate, spray powder 80%, at plant	RER	0	kg	7.48E-2	7.48E-2	7.48E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007
	calcium chloride, CaCl2, at regional storage	CH	0	kg	2.16E-2	2.16E-2	2.16E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007
	acetic acid, 98% in H2O, at plant	RER	0	kg	2.83E-3	2.83E-3	2.83E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for cleaning
	hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	RER	0	kg	4.56E-2	4.56E-2	4.56E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for surface etching
	hydrogen fluoride, at plant	GLO	0	kg	3.77E-2	3.77E-2	3.77E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for etching phosphor glass
	nitric acid, 50% in H2O, at plant	RER	0	kg	2.67E-2	2.67E-2	2.67E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for etching phosphor glass
	sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	RER	0	kg	1.57E-1	1.57E-1	1.57E-1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for etching and cleaning
gases	argon, liquid, at plant	RER	0	kg	2.57E-2	2.57E-2	2.57E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	oxygen, liquid, at plant	RER	0	kg	1.02E-1	1.02E-1	1.02E-1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, diffusion
	nitrogen, liquid, at plant	RER	0	kg	1.85E+0	1.85E+0	1.85E+0	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, diffusion and damage etching
	tetrafluoroethylene, at plant	RER	0	kg	3.16E-3	3.16E-3	3.16E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, aggregate value for different fluorinated source gases
packaging	polystyrene, expandable, at plant	RER	0	kg	4.07E-4	4.07E-4	4.07E-4	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, packaging
transport	transport, transoceanic freight ship	OCE	0	tkm	8.85E-1	8.85E-1	8.85E-1	2.09	(4,5,na,na,na,na); 20% of wafer production from overseas, 10000km
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	4.88E-1	5.00E-1	5.58E-1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 100km, 500km for wafers
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	1.52E+0	1.52E+0	1.52E+0	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 600km
	water, completely softened, at plant	RER	0	kg	1.37E+2	1.37E+2	1.37E+2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	treatment, PV cell production effluent, to wastewater treatment, class 3	CH	0	m3	2.17E-1	2.17E-1	2.17E-1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data, mix of neutral, alkaline and acid solution and organic waste
	disposal, waste, Si waferprod., inorg, 9.4% water, to residual material landfill	CH	0	kg	2.76E-1	2.76E-1	2.76E-1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
emission air, high population density	Heat, waste	-	-	MJ	1.09E+2	1.09E+2	1.09E+2	1.07	(1,2,1,1,1,3); Calculation
	Aluminium	-	-	kg	7.73E-4	7.73E-4	7.73E-4	5.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	-	-	kg	1.19E-4	1.19E-4	1.19E-4	1.51	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, calculated as 50% of CO2-eq for FC-gases
	Hydrogen chloride	-	-	kg	2.66E-4	2.66E-4	2.66E-4	1.51	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	Hydrogen fluoride	-	-	kg	4.85E-6	4.85E-6	4.85E-6	1.51	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	Lead	-	-	kg	7.73E-4	7.73E-4	7.73E-4	5.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	-	-	kg	1.94E-1	1.94E-1	1.94E-1	1.51	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	Nitrogen oxides	-	-	kg	5.00E-5	5.00E-5	5.00E-5	1.61	(3,4,3,3,1,5); Hagedorn 1992, due to nitric acid use
	Methane, tetrafluoro-, R-14	-	-	kg	2.48E-4	2.48E-4	2.48E-4	1.51	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, calculated as 50% of CO2-eq for FC-gases
	Particulates, < 2.5 um	-	-	kg	2.66E-3	2.66E-3	2.66E-3	3.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	Silicon	-	-	kg	7.27E-5	7.27E-5	7.27E-5	5.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	Silver	-	-	kg	7.73E-4	7.73E-4	7.73E-4	5.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	Sodium	-	-	kg	4.85E-5	4.85E-5	4.85E-5	5.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	Tin	-	-	kg	7.73E-4	7.73E-4	7.73E-4	5.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data

Anhang 4-10: Einzelprozessrohdaten der Produktion kristalliner Standardsiliziumsolarmodule. Daten aus [Jungbluth *et al.* 2012, S. 72]

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	photovoltaic laminate, single-Si, at plant	photovoltaic panel, single-Si, at plant	Uncertainty	StandardDeviation95	GeneralComment	de Wild 2007, 210 Wp	Solar-Fabrik	GSS Ostthüringen, 160 Wp	Solon AG	Solar-Fabrik
	Location				RER	RER				RER	DE	DE	DE	DE
	InfrastructureProcess				1	1				2005	2006	2001	2000	2001
	Unit				m2	m2				m2	m2	m2	m2	m2
technosphere	electricity, medium voltage, production UCTE, at grid	UCTE	0	kWh	4.71E+0	4.71E+0	1	1.14	(3,3,1,1,1,3); calculated mean figure of 3 con	6.83E+0	7.66E-1	6.54E+0	2.81E+1	4.09E+0
	natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW	RER	0	MJ	5.41E+0	5.41E+0	1	1.14	(3,3,1,1,1,3); calculated mean figure of 3 con	-	4.72E+0	1.15E+1		4.25E+0
infrastructure	photovoltaic panel factory	GLO	1	unit	4.00E-6	4.00E-6	1	3.02	(1,4,1,3,1,3); Literature			-		
	tap water, at user	RER	0	kg	2.13E+1	2.13E+1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, glass rinsing an	2.13E+1		2.19E+1		
	tempering, flat glass	RER	0	kg	1.01E+1	1.01E+1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007					
	wire drawing, copper	RER	0	kg	1.13E-1	1.13E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); estimation for use of copper wires					
cells	photovoltaic cell, single-Si, at plant	RER	0	m2	9.32E-1	9.32E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, Estimation 60 ce	9.32E-1		6.85E+1		
materials	aluminium alloy, AlMg3, at plant	RER	0	kg	-	2.63E+0	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, profile for frame	2.63E+0		2.40E+0		
	nickel, 99.5%, at plant	GLO	0	kg	1.63E-4	1.63E-4	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, plating on interco	1.63E-4				
	brazing solder, cadmium free, at plant	RER	0	kg	8.76E-3	8.76E-3	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, Sn60Pb40 platin	8.76E-3		-		
	solar glass, low-iron, at regional storage	RER	0	kg	1.01E+1	1.01E+1	1	1.24	(1,4,1,3,3,3); de Wild 2007, 4mm thickness (	1.01E+1		1.15E+1		
	copper, at regional storage	RER	0	kg	1.13E-1	1.13E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, copper ribbons f	1.13E-1		5.48E-2		
	glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant	RER	0	kg	1.88E-1	1.88E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, polyphenyenoxic	1.88E-1		-		
	ethylvinylacetate, foil, at plant	RER	0	kg	1.00E+0	1.00E+0	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, EVA consumptio	1.00E+0		9.13E-1		
	polyvinylfluoride film, at plant	US	0	kg	1.10E-1	1.10E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, back foil, for sola	1.10E-1		4.56E-2		
	polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant	RER	0	kg	3.73E-1	3.73E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, back foil, for sola	3.73E-1		1.64E+0		
	silicone product, at plant	RER	0	kg	1.22E-1	1.22E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, kit to attach fram	1.22E-1		3.42E-3		
auxiliary	acetone, liquid, at plant	RER	0	kg	1.30E-2	1.30E-2	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, cleaning fluid	1.30E-2		3.61E-5		
materials	methanol, at regional storage	CH	0	kg	2.16E-3	2.16E-3	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); GSS 2001, auxiliary material			2.16E-3		
	vinyl acetate, at plant	RER	0	kg	1.64E-3	1.64E-3	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); GSS 2001, ethylacetat, auxiliary material			1.64E-3		
	lubricating oil, at plant	RER	0	kg	1.61E-3	1.61E-3	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); GSS 2001, auxiliary material			1.61E-3		
	corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant	RER	0	kg	1.10E+0	1.10E+0	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, packaging estim	1.10E+0		-		
	1-propanol, at plant	RER	0	kg	8.14E-3	8.14E-3	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, soldering flux, 95	8.14E-3		1.10E-2		
transport	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	1.55E+0	1.81E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 100km, cells 500km			-		
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	7.87E+0	9.45E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 600km			-		
disposal	disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration	CH	0	kg	3.00E-2	3.00E-2	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); Alsema (personal communicat	3.00E-2		8.22E-1		
	disposal, polyvinylfluoride, 0.2% water, to municipal incineration	CH	0	kg	1.10E-1	1.10E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); Calculation, including disposal of the panel after life			-		
	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration	CH	0	kg	1.69E+0	1.69E+0	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); Calculation, including disposal	7.51E-2		-		
	disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration	CH	0	kg	1.61E-3	1.61E-3	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); Calculation, oil used during production			5.84E-3		
	treatment, sewage, from residence, to wastewater treatment, class 2	CH	0	m3	2.13E-2	2.13E-2	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); Calculation, water use			-		
emission air	Heat, waste	-	-	MJ	1.70E+1	1.70E+1	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); Calculation, electricity use			-		
												-		
	total weight			kg	12.4	15.0				15.9		16.6		
	Disposal			kg	1.8	1.8				0.1		0.8		

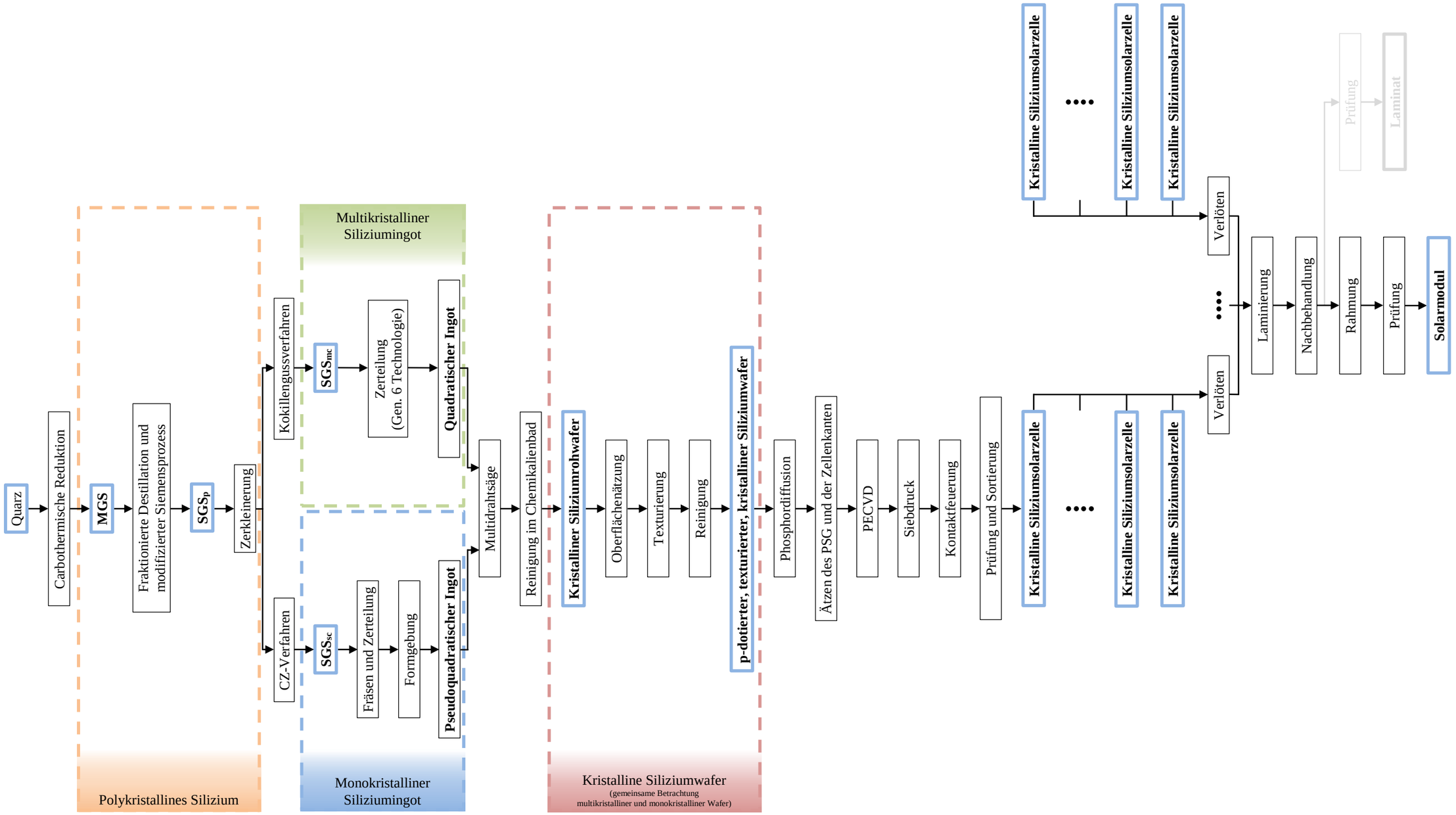
Anhang 4-11: Zusammenfassung der separat betrachteten Fertigungsschritte des definierten Standardsolarmoduls auf Basis der kristallinen Siliziumsolartechnologie inklusive Verweis zum jeweils behandelnden Kapitel.

Kapitel 4.5.2: Siliziumaufreinigung und Ingotherstellung

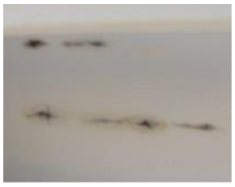
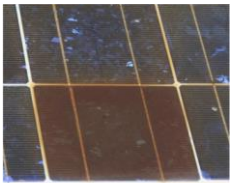
Kapitel 4.5.3: Waferfertigung

Kapitel 4.5.4: Produktion kristalliner Siliziumsolarzellen

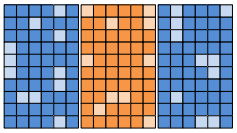
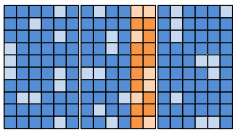
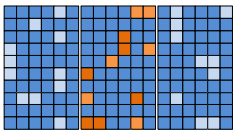
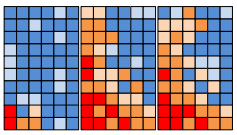
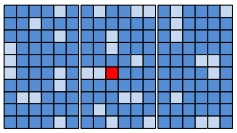
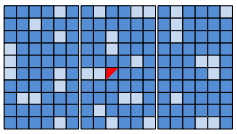
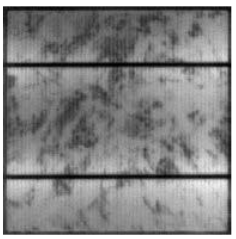
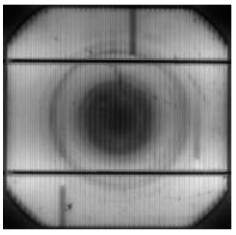
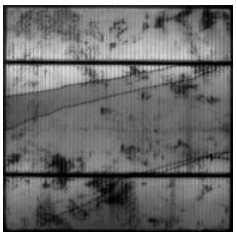
Kapitel 4.5.5: Fertigung Standardsolarmodul



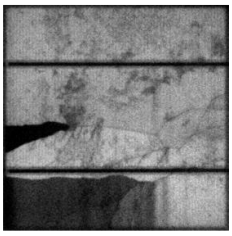
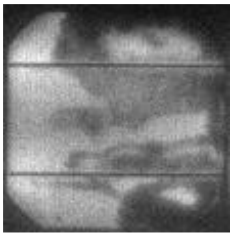
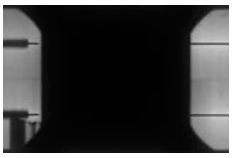
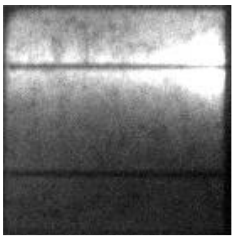
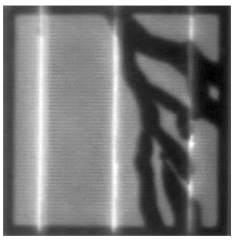
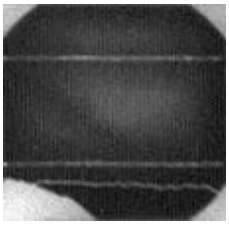
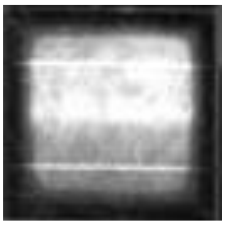
Anhang 5-1: Tabellarische Zusammenfassung aller im Kapitel 5.2.1.2 aufgeführten Defekte, geordnet nach Detektionsmethode. Abbildungen aus [Köntges 2014] und [Battistutti 2013] mit Erlaubnis.

	Defekt	Schadensbild	Anmerkung
Optische Kontrolle	**Brandflecken auf der Rückseitenfolie**		Anzeichen für Feuerentwicklung
	Delaminierung der Frontseite		Sicherheitsrisiko und leistungsmindernd
	Delaminierung der Rückfolie		Sicherheitsrisiko
	Wesentlich stärkere Braunfärbung einer Zelle		Stärkere Erwärmung dieser Zelle → Brandgefahr
	„Schneckenspuren“		Deutet auf einen Riss in der Zelle hin → Brandgefahr
	Glasbruch		Dargestellt als Folge zu fest angezogener Schrauben zur Moduleinspannung
	Deformation Modulrahmen		Inklusive Folgeschaden Glasbruch

Fortsetzung **Anhang 5-1**.

	Defekt	Schadensbild	Anmerkung
Thermografie	**Defektes oder nicht ordnungsgemäß angeschlossenes Modul**		Ein Modul wärmer
	Defekter String / Bypassdiode kurzgeschlossen		Ein String wärmer als die restlichen desselben Moduls
	Modul kurzgeschlossen		Einzelzellen eines Moduls wärmer, aber ohne erkennbares Muster
	Punktuell hohe Widerstände durch PID		Einzelzellen stark erwärmt, ausgehend von einer Modulecke
	Defekte Zelle		Eine Zelle stark erhitzt
	Zellenbruch		Teil einer Zelle stark erhitzt
Elektrolumineszenz	**Kristallgrenzen in einer multikristallinen Siliziumsolarzelle**		Zum Vergleich: Kein Defekt
	Streifenringe einer monokristallinen Siliziumsolarzelle		
	Bruchzonen in einer Zelle ohne Inaktivierung von Zellenbereichen		

Fortsetzung **Anhang 5-1**.

	Defekt	Schadensbild	Anmerkung
Elektrolumineszenz	**Inaktive Zellenbereiche infolge von Bruchzonen**		Gefahr von Hotspots
	Korrosion infolge von eingedrungener Feuchtigkeit		Leistungsverlust
	Bruch der Zellenverbinder		Gefahr von Hotspots
	Bruch eines Zellenverbinders		Gefahr von Hotspots
UV-Fluoreszenz	**Bruchzonen in der Zelle**		Gefahr von Hotspots
	Inaktive Zellenbereiche infolge von Bruchzonen		Gefahr von Hotspots
	Bruch eines Zellenverbinders		Gefahr von Hotspots

Anhang 5-2: Tabellarische Zusammenfassung aller in Abbildung 5-17 aufgeführten Werte inklusive farblicher Zuordnung nach der entsprechenden Abbildungslegende.

Angaben in MW_p	absolute Werte der Abbildung 5-17									Durchschnitt	Standard-abweichung	
Jahr	ursprüngliche Berechnung	Erste Variation	Zweite Variation	Untere Kante 99% Konfi.-interv.	Untere Kante 95% Konfi.-interv.	Untere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 95% Konfi.-interv.	Obere Kante 99% Konfi.-interv.		absolut	relativ [%]
2028	96,60	117,22	56,55	52,61	61,62	66,13	114,12	118,63	127,65	90,13	25,19	27,95
2029	124,02	153,05	61,74	56,20	69,83	76,65	149,23	156,04	169,68	112,94	38,09	33,73
2030	167,57	215,77	70,87	61,66	83,23	94,01	208,80	219,58	241,15	151,40	60,25	39,79
2031	236,50	310,64	85,23	71,07	104,65	121,43	300,15	316,93	350,51	210,79	93,80	44,50
2032	339,70	434,76	107,63	89,36	138,55	163,14	424,92	449,52	498,70	294,03	137,40	46,73
2033	481,03	561,99	141,50	123,50	188,71	221,31	568,37	600,98	666,18	394,84	182,16	46,14
2034	652,80	674,50	190,06	172,97	252,95	292,94	718,63	758,62	838,60	505,79	223,43	44,17
2035	845,68	773,89	255,73	233,61	327,69	374,73	875,48	922,51	1.016,59	625,10	262,82	42,04
2036	1.049,85	860,79	340,26	303,37	410,77	464,47	1.036,13	1.089,83	1.197,23	750,30	300,04	39,99
2037	1.254,53	935,44	444,51	381,90	501,15	560,78	1.195,53	1.255,16	1.374,42	878,16	333,16	37,94
2038	1.448,80	998,63	568,45	469,89	598,55	662,88	1.347,70	1.412,03	1.540,69	1.005,29	359,43	35,75
2039	1.621,27	1.050,46	710,74	567,87	702,35	769,60	1.485,39	1.552,63	1.687,11	1.127,49	375,69	33,32
2040	1.761,74	1.091,56	868,77	675,41	811,25	879,17	1.602,21	1.670,13	1.805,98	1.240,69	379,50	30,59
2041	1.861,85	1.122,71	1.038,52	790,07	922,47	988,67	1.693,38	1.759,58	1.891,98	1.341,02	369,88	27,58
2042	1.915,93	1.144,84	1.214,54	906,39	1.031,04	1.093,37	1.756,84	1.819,16	1.943,82	1.425,10	348,23	24,44
2043	1.921,61	1.158,99	1.390,15	1.014,65	1.128,95	1.186,09	1.794,41	1.851,56	1.965,85	1.490,25	319,29	21,42
2044	1.880,19	1.166,33	1.557,75	1.099,97	1.204,46	1.256,70	1.812,82	1.865,06	1.969,54	1.534,76	291,89	19,02
2045	1.796,54	1.168,12	1.709,37	1.143,94	1.243,44	1.293,20	1.822,82	1.872,57	1.972,08	1.558,01	277,98	17,84
2046	1.678,63	1.165,64	1.837,33	1.133,55	1.236,15	1.287,46	1.833,61	1.884,91	1.987,52	1.560,53	286,65	18,37
2047	1.536,68	1.160,14	1.935,09	1.072,65	1.185,91	1.242,54	1.845,40	1.902,03	2.015,29	1.543,97	316,42	20,49
2048	1.382,11	1.152,83	1.998,02	979,39	1.107,14	1.171,01	1.850,96	1.914,84	2.042,58	1.510,99	356,88	23,62
2049	1.226,30	1.144,82	2.024,13	874,17	1.016,17	1.087,18	1.843,00	1.914,00	2.056,00	1.465,09	396,70	27,08
2050	1.079,55	1.137,09	2.014,48	773,11	926,25	1.002,82	1.817,92	1.894,49	2.047,63	1.410,37	427,82	30,33
2051	950,13	1.130,44	1.973,23	687,05	846,67	926,48	1.776,06	1.855,87	2.015,49	1.351,27	445,91	33,00
2052	843,75	1.125,50	1.907,16	622,06	783,09	863,60	1.720,67	1.801,18	1.962,21	1.292,14	449,84	34,81
2053	763,38	1.122,65	1.824,76	580,36	738,14	817,03	1.656,83	1.735,72	1.893,50	1.236,93	440,78	35,63
2054	709,40	1.122,06	1.734,94	561,21	712,03	787,44	1.590,16	1.665,57	1.816,39	1.188,80	421,32	35,44
2055	680,05	1.123,64	1.645,59	561,96	703,21	773,84	1.525,68	1.596,30	1.737,56	1.149,76	394,61	34,32
2056	671,97	1.127,04	1.562,40	578,94	709,08	774,14	1.466,79	1.531,86	1.661,99	1.120,47	363,55	32,45
2057	680,89	1.131,71	1.488,05	608,25	726,47	785,59	1.414,85	1.473,96	1.592,18	1.100,22	330,28	30,02
2058	702,16	1.136,94	1.422,17	646,11	752,08	805,07	1.369,11	1.422,10	1.528,07	1.087,09	296,05	27,23
2059	731,25	1.141,79	1.361,89	689,02	782,57	829,35	1.327,27	1.374,05	1.467,60	1.078,31	261,34	24,24
2060	764,00	1.145,12	1.303,00	733,69	814,68	855,17	1.286,24	1.326,73	1.407,72	1.070,71	226,25	21,13
2061	796,87	1.145,84	1.241,27	776,80	845,18	879,36	1.243,29	1.277,48	1.345,86	1.061,33	191,01	18,00
2062	827,09	1.143,24	1.173,62	814,58	870,67	898,72	1.197,25	1.225,29	1.281,38	1.047,98	156,69	14,95
2063	852,48	1.136,31	1.098,59	841,66	886,71	909,24	1.149,02	1.171,54	1.216,59	1.029,13	125,85	12,23
2064	871,23	1.122,32	1.016,13	849,93	886,77	905,19	1.101,26	1.119,68	1.156,52	1.003,23	102,91	10,26
2065	882,66	1.102,10	928,00	830,03	863,89	880,82	1.061,03	1.077,95	1.111,81	970,92	94,59	9,74
2066	886,77	1.077,23	836,90	779,38	816,45	834,98	1.032,29	1.050,82	1.087,89	933,64	103,56	11,09
2067	883,46	1.045,88	745,27	708,53	752,51	774,50	1.008,58	1.030,57	1.074,54	891,54	122,86	13,78
2068	873,23	1.007,65	655,86	629,68	681,57	707,51	983,65	1.009,60	1.061,48	845,58	144,94	17,14
2069	856,34	958,84	570,95	550,92	609,66	639,04	951,72	981,09	1.039,84	795,38	164,12	20,63

Fortsetzung **Anhang 5-2**.

Angaben in MW_p	absolute Werte der Abbildung 5-17									Durchschnitt	Standard-abweichung	
Jahr	ursprüngliche Berechnung	Erste Variation	Zweite Variation	Untere Kante 99% Konfi.-interv.	Untere Kante 95% Konfi.-interv.	Untere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 95% Konfi.-interv.	Obere Kante 99% Konfi.-interv.		absolut	relativ [%]
2070	833,00	894,59	492,52	476,66	539,95	571,60	908,48	940,12	1.003,41	740,04	176,81	23,89
2071	807,02	830,42	425,78	411,46	477,85	511,05	864,43	897,63	964,03	687,74	185,48	26,97
2072	780,34	768,84	373,45	359,12	426,83	460,68	821,07	854,92	922,63	640,88	189,15	29,51
2073	760,05	742,03	342,58	327,86	396,84	431,32	798,45	832,93	901,91	614,89	192,69	31,34
2074	742,53	716,92	328,48	313,80	381,61	415,52	776,44	810,35	878,16	595,98	189,44	31,79
2075	729,19	694,63	330,68	316,32	380,85	413,11	756,56	788,83	853,35	584,84	180,27	30,82
2076	721,22	676,32	347,92	333,95	393,52	423,30	740,34	770,12	829,69	581,82	166,40	28,60
2077	719,45	662,88	378,50	364,72	418,12	444,82	729,06	755,76	809,17	586,94	149,19	25,42
2078	724,36	654,87	420,64	406,42	452,93	476,18	723,73	746,99	793,49	599,96	129,93	21,66
2079	736,02	652,53	472,74	456,79	496,11	515,78	725,08	744,74	784,06	620,43	109,86	17,71
2080	754,13	655,78	533,42	513,30	545,61	561,77	733,78	749,94	782,26	647,78	90,28	13,94
2081	778,03	664,30	601,49	572,44	598,60	611,67	750,88	763,95	790,11	681,28	73,06	10,72
2082	806,75	677,52	675,76	628,64	650,60	661,58	778,44	789,42	811,37	720,01	61,34	8,52
2083	839,06	694,68	754,87	674,66	695,86	706,46	819,28	829,88	851,07	762,87	59,22	7,76
2084	873,58	714,91	837,26	707,47	731,77	743,92	873,25	885,39	909,69	808,58	67,88	8,39
2085	908,83	737,29	921,06	730,76	760,79	775,80	935,65	950,67	980,70	855,73	83,90	9,80
2086	943,29	760,90	1.004,22	748,82	785,82	804,33	1.001,28	1.019,79	1.056,79	902,80	103,38	11,45
2087	975,53	784,88	1.084,49	763,86	808,19	830,35	1.066,26	1.088,42	1.132,74	948,30	123,82	13,06
2088	1.004,25	808,46	1.159,62	776,76	828,19	853,90	1.127,65	1.153,36	1.204,79	990,77	143,68	14,50
2089	1.028,31	830,98	1.227,44	787,82	845,76	874,72	1.183,10	1.212,07	1.270,00	1.028,91	161,85	15,73
2090	1.046,86	851,94	1.286,00	797,19	860,73	892,50	1.230,70	1.262,47	1.326,01	1.061,60	177,51	16,72
2091	1.059,29	870,98	1.333,71	804,98	872,99	907,00	1.268,99	1.303,00	1.371,01	1.087,99	190,00	17,46
2092	1.065,28	887,87	1.369,43	811,32	882,50	918,09	1.296,96	1.332,55	1.403,73	1.107,53	198,85	17,95
2093	1.063,58	901,26	1.391,30	815,11	888,07	924,55	1.312,88	1.349,36	1.422,31	1.118,71	203,82	18,22
2094	1.056,17	912,89	1.400,97	818,22	891,54	928,21	1.318,48	1.355,14	1.428,47	1.123,34	204,84	18,23
2095	1.043,22	922,47	1.398,56	820,41	892,74	928,91	1.313,92	1.350,09	1.422,42	1.121,42	202,08	18,02
2096	1.025,27	929,99	1.384,86	821,61	891,72	926,78	1.299,96	1.335,02	1.405,13	1.113,37	195,87	17,59
2097	1.003,21	935,60	1.361,16	821,85	888,69	922,11	1.277,87	1.311,29	1.378,13	1.099,99	186,73	16,98
2098	978,02	939,47	1.329,03	821,11	883,84	915,21	1.249,13	1.280,50	1.343,24	1.082,17	175,26	16,20
2099	950,73	941,76	1.290,11	819,35	877,39	906,41	1.215,33	1.244,35	1.302,39	1.060,87	162,14	15,28
2100	922,37	942,63	1.246,03	816,51	869,50	895,99	1.178,03	1.204,53	1.257,51	1.037,01	148,03	14,27
2101	893,92	942,20	1.198,26	812,53	860,34	884,24	1.138,68	1.162,58	1.210,39	1.011,46	133,55	13,20
2102	866,27	940,57	1.148,03	807,35	850,03	871,37	1.098,54	1.119,88	1.162,56	984,96	119,23	12,11
2103	840,17	937,82	1.096,30	800,88	838,66	857,55	1.058,64	1.077,53	1.115,31	958,10	105,54	11,02
2104	816,41	934,21	1.043,98	793,11	826,38	843,01	1.020,06	1.036,69	1.069,95	931,53	92,92	9,98
2105	795,46	929,78	991,57	783,65	812,96	827,61	983,59	998,24	1.027,55	905,60	81,87	9,04
2106	777,31	924,31	939,15	771,45	797,60	810,67	949,84	962,91	989,06	880,26	73,04	8,30
2107	762,06	917,79	886,97	755,31	779,41	791,46	919,75	931,80	955,90	855,61	67,33	7,87
2108	749,63	910,20	835,33	734,00	757,48	769,22	894,21	905,95	929,43	831,72	65,60	7,89
2109	739,82	901,53	784,60	707,10	731,51	743,71	873,59	885,79	910,19	808,65	68,17	8,43
2110	732,37	891,78	735,31	675,57	702,22	715,55	857,42	870,75	897,40	786,48	74,46	9,47
2111	726,91	880,95	688,16	641,31	671,11	686,02	844,66	859,57	889,37	765,34	83,27	10,88

Anhang 5-3: Tabellarische Zusammenfassung der in Kapitel 5.2.2.4 berechneten und in Abbildung 5-18 dargestellten Prognosewerte und der zugrunde liegenden technologiebereinigten Neuinstallationen für die Beispielregionen Sachsen samt deutschseitiger Anrainer, Ostdeutsches PV-Produktionscluster sowie den Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld Wolfen. Die farbliche Zuordnung erfolgt nach der entsprechenden Abbildungslegende.

Regionale Altmodulprognosen in [MW$_p$]

Sachsen samt deutschseitiger Anrainer

Jahr	technologiebereinigte Neuinstallationen	Untere Kante 99% Konfi.-interv.	Untere Kante 95% Konfi.-interv.	Untere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 95% Konfi.-interv.	Obere Kante 99% Konfi.-interv.
1990	0,18	0,01					
1991	0,27	0,01					
1992	0,36	0,01					
1993	0,54	0,02					
1994	0,90	0,03					
1995	1,35	0,05					
1996	1,80	0,07					
1997	2,70	0,10					
1998	4,50	0,16					
1999	6,74	0,24					
2000	8,56	0,32					
2001	23,13	0,76					
2002	41,88	1,38					
2003	65,65	2,23					
2004	270,69	8,25					
2005	369,58	12,33					
2006	322,21	12,58					
2007	553,11	20,21					
2008	784,93	29,04					
2009	1.642,20	55,70					
2010	3.026,23	101,01					
2011	3.288,31	121,38					
2012	3.343,68	135,15					
2013	1.411,28	83,12					
2014	791,10	69,18					
2015	670,70	58,72					
2016	619,20	48,31					
2017	608,40	38,15					
2018	597,60	37,24					
2019	586,80	37,14					
2020	576,00	37,20					
2021	576,00	37,51					
2022	576,00	37,94					
2023	576,00	38,58					
2024	331,68	36,42					
2025	48,00	34,17					
2026	48,00	36,65					
2027	48,00	41,33					
2028	48,00	30,21	34,19	36,17	57,33	59,31	63,29
2029	48,00	31,45	37,65	40,76	73,77	76,87	83,07
2030	48,00	33,46	43,54	48,58	102,25	107,29	117,37
2031	48,00	37,28	53,28	61,28	146,47	154,47	170,48
2032	48,00	45,37	69,16	81,05	207,64	219,54	243,32
2033	48,00	61,45	93,23	109,12	278,28	294,17	325,95
2034	48,00	85,30	124,45	144,02	352,36	371,93	411,08
2035	48,00	114,75	160,94	184,04	429,91	453,00	499,20
2036	48,00	148,73	201,62	228,07	509,59	536,04	588,93
2037	48,00	187,07	245,97	275,42	588,94	618,39	677,30
2038	48,00	230,14	293,88	325,74	664,98	696,85	760,58
2039	48,00	278,27	345,08	378,48	734,07	767,48	834,28
2040	48,00	331,33	398,99	432,83	792,97	826,80	894,46
2041	48,00	388,21	454,31	487,36	839,20	872,25	938,35
2042	48,00	446,29	508,63	539,80	871,61	902,78	965,12
2043	48,00	500,87	558,05	586,64	890,98	919,57	976,75
2044	48,00	544,63	596,80	622,88	900,52	926,60	978,76
2045	48,00	568,33	617,75	642,47	905,54	930,26	979,68
2046	48,00	565,01	615,70	641,05	910,85	936,19	986,88

Ostdeutsches PV-Produktionscluster

Jahr	technologiebereinigte Neuinstallationen	Untere Kante 99% Konfi.-interv.	Untere Kante 95% Konfi.-interv.	Untere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 95% Konfi.-interv.	Obere Kante 99% Konfi.-interv.
1990	0,10	0,00					
1991	0,08	0,00					
1992	0,18	0,01					
1993	0,18	0,01					
1994	0,17	0,01					
1995	0,28	0,01					
1996	0,52	0,02					
1997	0,79	0,03					
1998	0,66	0,03					
1999	0,94	0,04					
2000	3,64	0,12					
2001	7,78	0,25					
2002	7,82	0,28					
2003	9,92	0,37					
2004	46,33	1,43					
2005	65,70	2,20					
2006	58,45	2,26					
2007	84,01	3,19					
2008	127,31	4,75					
2009	251,17	8,64					
2010	485,59	16,17					
2011	1.079,53	34,89					
2012	1.277,05	45,27					
2013	342,53	31,40					
2014	171,47	27,74					
2015	89,74	25,29					
2016	99,33	22,03					
2017	97,60	18,02					
2018	95,87	17,71					
2019	94,13	17,64					
2020	92,40	17,68					
2021	92,40	17,73					
2022	92,40	17,83					
2023	92,40	17,97					
2024	53,21	17,67					
2025	7,70	17,37					
2026	7,70	17,86					
2027	7,70	18,72					
2028	7,70	16,69	17,38	17,73	21,42	21,77	22,46
2029	7,70	16,97	18,02	18,54	24,13	24,65	25,71
2030	7,70	17,38	19,05	19,88	28,73	29,56	31,22
2031	7,70	17,76	20,61	22,04	37,25	38,68	41,54
2032	7,70	18,41	23,28	25,71	51,62	54,06	58,93
2033	7,70	21,10	28,14	31,67	69,16	72,68	79,72
2034	7,70	26,20	35,18	39,68	87,48	91,97	100,95
2035	7,70	32,97	43,80	49,22	106,85	112,26	123,09
2036	7,70	40,97	53,59	59,90	127,07	133,38	146,00
2037	7,70	50,04	64,35	71,50	147,66	154,82	169,13
2038	7,70	60,24	76,03	83,93	167,98	175,88	191,67
2039	7,70	71,70	88,61	97,07	187,06	195,52	212,42
2040	7,70	84,52	102,03	110,78	203,97	212,73	230,23
2041	7,70	98,59	116,08	124,83	217,91	226,65	244,14
2042	7,70	113,50	130,33	138,75	228,33	236,74	253,58
2043	7,70	128,33	143,98	151,81	235,11	242,94	258,59
2044	7,70	141,54	155,78	162,90	238,72	245,84	260,08
2045	7,70	150,83	163,94	170,50	240,30	246,85	259,97
2046	7,70	153,72	166,56	172,98	241,34	247,77	260,61

Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen

Jahr	technologiebereinigte Neuinstallationen	Untere Kante 99% Konfi.-interv.	Untere Kante 95% Konfi.-interv.	Untere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 95% Konfi.-interv.	Obere Kante 99% Konfi.-interv.
1990	0,002	0,01					
1991	0,004	0,01					
1992	0,005	0,01					
1993	0,032	0,01					
1994	0,018	0,01					
1995	0,020	0,00					
1996	0,030	0,00					
1997	0,050	0,00					
1998	0,070	0,00					
1999	0,085	0,00					
2000	0,100	0,01					
2001	0,300	0,01					
2002	0,500	0,02					
2003	0,800	0,03					
2004	1,000	0,04					
2005	2,000	0,07					
2006	2,000	0,08					
2007	3,000	0,11					
2008	5,000	0,18					
2009	13,774	0,44					
2010	50,205	1,53					
2011	143,549	4,38					
2012	145,985	5,15					
2013	47,732	2,25					
2014	22,896	1,84					
2015	6,316	1,49					
2016	6,020	1,04					
2017	5,915	0,58					
2018	5,810	0,54					
2019	5,705	0,53					
2020	5,600	0,54					
2021	5,600	0,55					
2022	5,600	0,56					
2023	5,600	0,56					
2024	3,192	0,54					
2025	0,462	0,51					
2026	0,462	0,52					
2027	0,462	0,54					
2028	0,462	0,49	0,50	0,51	0,61	0,62	0,64
2029	0,462	0,49	0,52	0,54	0,71	0,73	0,76
2030	0,462	0,47	0,55	0,59	0,98	1,02	1,09
2031	0,462	0,37	0,57	0,67	1,75	1,85	2,05
2032	0,462	0,26	0,69	0,91	3,23	3,45	3,88
2033	0,462	0,41	1,09	1,43	5,05	5,39	6,07
2034	0,462	0,86	1,75	2,20	6,94	7,39	8,28
2035	0,462	1,51	2,60	3,15	8,97	9,52	10,61
2036	0,462	2,29	3,59	4,23	11,12	11,77	13,06
2037	0,462	3,19	4,68	5,42	13,36	14,11	15,60
2038	0,462	4,20	5,87	6,71	15,62	16,46	18,13
2039	0,462	5,35	7,18	8,09	17,80	18,71	20,54
2040	0,462	6,67	8,59	9,55	19,78	20,74	22,67
2041	0,462	8,15	10,11	11,08	21,47	22,45	24,40
2042	0,462	9,78	11,69	12,64	22,78	23,74	25,64
2043	0,462	11,48	13,27	14,16	23,69	24,58	26,37
2044	0,462	13,09	14,72	15,54	24,21	25,03	26,66
2045	0,462	14,38	15,86	16,60	24,46	25,20	26,68
2046	0,462	15,04	16,44	17,14	24,62	25,32	26,72

Fortsetzung **Anhang 5-3**.

	Regionale Altmodulprognosen in [MW$_p$]																				
	Sachsen samt deutschseitiger Anrainer							**Ostdeutsches PV-Produktionscluster**							**Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen**						
Jahr	**technologiebereinigte Neuinstallationen**	**Untere Kante 99% Konfi.-interv.**	**Untere Kante 95% Konfi.-interv.**	**Untere Kante 90% Konfi.-interv.**	**Obere Kante 90% Konfi.-interv.**	**Obere Kante 95% Konfi.-interv.**	**Obere Kante 99% Konfi.-interv.**	**technologiebereinigte Neuinstallationen**	**Untere Kante 99% Konfi.-interv.**	**Untere Kante 95% Konfi.-interv.**	**Untere Kante 90% Konfi.-interv.**	**Obere Kante 90% Konfi.-interv.**	**Obere Kante 95% Konfi.-interv.**	**Obere Kante 99% Konfi.-interv.**	**technologiebereinigte Neuinstallationen**	**Untere Kante 99% Konfi.-interv.**	**Untere Kante 95% Konfi.-interv.**	**Untere Kante 90% Konfi.-interv.**	**Obere Kante 90% Konfi.-interv.**	**Obere Kante 95% Konfi.-interv.**	**Obere Kante 99% Konfi.-interv.**
2047	48,00	536,04	591,85	619,76	916,82	944,73	1.000,54	7,70	149,16	162,87	169,72	242,67	249,53	263,23	0,462	14,83	16,30	17,03	24,82	25,55	27,01
2048	48,00	490,28	553,25	584,73	919,89	951,37	1.014,34	7,70	138,63	154,03	161,73	243,72	251,42	266,83	0,462	13,85	15,49	16,31	25,05	25,87	27,51
2049	48,00	438,03	508,12	543,17	916,25	951,30	1.021,40	7,70	124,88	142,23	150,91	243,28	251,96	269,31	0,462	12,40	14,27	15,20	25,15	26,09	27,96
2050	48,00	387,49	463,19	501,05	903,98	941,83	1.017,54	7,70	110,48	129,53	139,06	240,44	249,96	269,01	0,462	10,79	12,87	13,91	25,00	26,04	28,12
2051	48,00	344,19	423,18	462,68	883,12	922,61	1.001,60	7,70	97,29	117,45	127,53	234,85	244,94	265,10	0,462	9,28	11,51	12,63	24,51	25,63	27,86
2052	48,00	311,25	390,98	430,85	855,22	895,09	974,82	7,70	86,44	106,99	117,27	226,68	236,96	257,51	0,462	8,00	10,30	11,45	23,69	24,84	27,14
2053	48,00	289,84	367,96	407,02	822,81	861,87	939,99	7,70	78,48	98,70	108,81	216,43	226,54	246,76	0,462	7,04	9,31	10,45	22,57	23,71	25,99
2054	48,00	279,61	354,23	391,54	788,72	826,03	900,65	7,70	73,47	92,72	102,35	204,84	214,47	233,73	0,462	6,41	8,58	9,67	21,23	22,32	24,49
2055	48,00	279,26	349,07	383,97	755,51	790,42	860,22	7,70	71,12	88,94	97,86	192,71	201,63	219,45	0,462	6,09	8,09	9,09	19,75	20,75	22,76
2056	48,00	286,97	351,17	383,27	724,99	757,09	821,30	7,70	70,95	87,04	95,09	180,75	188,80	204,89	0,462	6,01	7,80	8,69	18,23	19,12	20,91
2057	48,00	300,77	358,98	388,09	697,93	727,04	785,25	7,70	72,36	86,60	93,71	169,47	176,59	190,82	0,462	6,10	7,66	8,44	16,72	17,50	19,05
2058	48,00	318,79	370,86	396,90	674,06	700,10	752,17	7,70	74,79	87,15	93,34	159,16	165,34	177,71	0,462	6,29	7,61	8,27	15,29	15,95	17,27
2059	48,00	339,28	385,16	408,10	652,32	675,27	721,15	7,70	77,68	88,26	93,56	149,90	155,19	165,78	0,462	6,49	7,59	8,14	13,98	14,53	15,63
2060	48,00	360,63	400,30	420,13	631,29	651,12	690,80	7,70	80,54	89,49	93,97	141,61	146,09	155,04	0,462	6,63	7,54	7,99	12,82	13,27	14,18
2061	48,00	381,18	414,66	431,40	609,63	626,38	659,86	7,70	82,88	90,40	94,16	134,20	137,96	145,48	0,462	6,62	7,38	7,76	11,82	12,20	12,96
2062	48,00	399,01	426,52	440,28	586,70	600,46	627,97	7,70	84,20	90,57	93,75	127,64	130,83	137,19	0,462	6,40	7,08	7,41	11,01	11,35	12,03
2063	48,00	411,52	433,71	444,81	562,95	574,04	596,24	7,70	84,01	89,58	92,36	122,00	124,78	130,35	0,462	5,97	6,62	6,94	10,39	10,71	11,36
2064	48,00	414,83	433,13	442,29	539,71	548,86	567,16	7,70	81,99	87,15	89,73	117,19	119,77	124,93	0,462	5,41	6,06	6,39	9,90	10,23	10,88
2065	48,00	404,62	421,57	430,04	520,23	528,71	545,65	7,70	78,22	83,35	85,91	113,19	115,75	120,88	0,462	4,80	5,48	5,83	9,47	9,81	10,50
2066	48,00	379,96	398,45	407,70	506,16	515,41	533,91	7,70	73,14	78,52	81,21	109,83	112,52	117,90	0,462	4,22	4,93	5,29	9,07	9,42	10,13
2067	48,00	345,85	367,59	378,46	494,16	505,03	526,76	7,70	67,37	73,13	76,01	106,68	109,56	115,32	0,462	3,71	4,44	4,80	8,67	9,03	9,76
2068	48,00	307,94	333,42	346,16	481,76	494,50	519,97	7,70	61,44	67,60	70,68	103,46	106,54	112,70	0,462	3,27	4,00	4,37	8,26	8,62	9,35
2069	48,00	270,08	298,76	313,10	465,74	480,08	508,76	7,70	55,74	62,20	65,43	99,85	103,08	109,55	0,462	2,91	3,63	3,99	7,82	8,18	8,90
2070	48,00	234,40	265,21	280,62	444,62	460,02	490,84	7,70	50,53	57,13	60,43	95,56	98,86	105,46	0,462	2,61	3,30	3,64	7,29	7,63	8,32
2071	48,00	202,98	235,19	251,30	422,76	438,87	471,08	7,70	45,84	52,27	55,48	89,67	92,88	99,30	0,462	2,35	2,96	3,27	6,51	6,82	7,42
2072	48,00	177,64	210,42	226,80	401,24	417,62	450,40	7,70	41,77	47,94	51,02	83,85	86,94	93,11	0,462	2,11	2,66	2,93	5,84	6,12	6,66
2073	48,00	162,57	195,97	212,67	390,41	407,11	440,50	7,70	39,85	46,10	49,23	82,51	85,63	91,89	0,462	2,05	2,59	2,85	5,72	5,99	6,53
2074	48,00	155,80	188,66	205,08	379,95	396,38	429,23	7,70	39,42	45,58	48,66	81,46	84,54	90,70	0,462	2,09	2,62	2,88	5,66	5,92	6,44
2075	48,00	157,04	188,34	203,99	370,58	386,22	417,52	7,70	40,46	46,37	49,33	80,81	83,77	89,68	0,462	2,25	2,75	3,00	5,65	5,90	6,40
2076	48,00	165,61	194,55	209,02	363,03	377,49	406,43	7,70	42,89	48,43	51,20	80,68	83,45	88,99	0,462	2,52	2,99	3,22	5,72	5,96	6,43
2077	48,00	180,58	206,57	219,57	357,92	370,92	396,91	7,70	46,60	51,67	54,20	81,16	83,69	88,76	0,462	2,90	3,33	3,55	5,87	6,09	6,52
2078	48,00	200,90	223,60	234,95	355,74	367,09	389,78	7,70	51,44	55,96	58,23	82,32	84,58	89,11	0,462	3,38	3,77	3,97	6,09	6,29	6,69
2079	48,00	225,52	244,77	254,39	356,82	366,45	385,69	7,70	57,23	61,18	63,16	84,20	86,17	90,13	0,462	3,95	4,31	4,49	6,39	6,57	6,92
2080	48,00	253,24	269,10	277,04	361,50	369,43	385,30	7,70	63,78	67,16	68,85	86,84	88,53	91,91	0,462	4,61	4,92	5,08	6,76	6,92	7,23
2081	48,00	282,38	295,26	301,70	370,23	376,67	389,55	7,70	70,75	73,62	75,05	90,32	91,76	94,63	0,462	5,32	5,60	5,74	7,21	7,35	7,63
2082	48,00	310,29	321,10	326,50	384,01	389,41	400,22	7,70	77,61	80,13	81,39	94,84	96,10	98,62	0,462	6,05	6,30	6,43	7,76	7,89	8,14
2083	48,00	333,43	343,80	348,99	404,21	409,40	419,78	7,70	83,66	86,14	87,39	100,62	101,86	104,35	0,462	6,73	6,98	7,10	8,42	8,55	8,80
2084	48,00	350,11	361,95	367,87	430,88	436,80	448,64	7,70	88,47	91,29	92,70	107,71	109,12	111,94	0,462	7,30	7,58	7,72	9,21	9,35	9,63
2085	48,00	362,01	376,64	383,95	461,80	469,11	483,73	7,70	92,20	95,65	97,38	115,74	117,47	120,92	0,462	7,76	8,10	8,27	10,10	10,27	10,61
2086	48,00	371,23	389,28	398,31	494,40	503,43	521,48	7,70	95,19	99,44	101,57	124,21	126,33	130,59	0,462	8,13	8,55	8,77	11,04	11,26	11,68
2087	48,00	378,89	400,56	411,40	526,76	537,59	559,27	7,70	97,64	102,77	105,34	132,66	135,22	140,36	0,462	8,43	8,96	9,22	12,00	12,26	12,78
2088	48,00	385,42	410,63	423,23	557,39	569,99	595,19	7,70	99,68	105,70	108,70	140,72	143,73	149,74	0,462	8,68	9,30	9,62	12,92	13,23	13,85
2089	48,00	391,01	419,46	433,68	585,11	599,34	627,79	7,70	101,36	108,21	111,63	148,07	151,50	158,34	0,462	8,89	9,60	9,96	13,78	14,13	14,85
2090	48,00	395,73	426,98	442,61	608,96	624,59	655,84	7,70	102,72	110,30	114,09	154,43	158,22	165,80	0,462	9,05	9,86	10,26	14,53	14,93	15,74
2091	48,00	399,65	433,14	449,89	628,18	644,93	678,43	7,70	103,79	111,97	116,06	159,57	163,66	171,83	0,462	9,18	10,06	10,49	15,16	15,60	16,47
2092	48,00	402,83	437,92	455,47	642,25	659,80	694,89	7,70	104,62	113,22	117,52	163,30	167,60	176,21	0,462	9,28	10,21	10,67	15,63	16,10	17,03
2093	48,00	404,76	440,75	458,75	650,32	668,31	704,30	7,70	105,08	113,92	118,34	165,37	169,79	178,62	0,462	9,33	10,29	10,78	15,91	16,40	17,36
2094	48,00	406,35	442,53	460,62	653,19	671,28	707,46	7,70	105,44	114,30	118,74	165,93	170,36	179,23	0,462	9,37	10,35	10,83	16,02	16,51	17,49
2095	48,00	407,46	443,14	460,98	650,91	668,75	704,43	7,70	105,67	114,36	118,70	164,97	169,32	178,01	0,462	9,41	10,37	10,85	15,95	16,43	17,39
2096	48,00	408,10	442,66	459,94	643,89	661,17	695,73	7,70	105,75	114,08	118,24	162,55	166,71	175,04	0,462	9,43	10,35	10,81	15,71	16,17	17,09
2097	48,00	408,25	441,16	457,61	632,74	649,19	682,10	7,70	105,71	113,49	117,39	158,82	162,71	170,50	0,462	9,44	10,30	10,73	15,29	15,72	16,58
2098	48,00	407,92	438,74	454,15	618,21	633,62	664,44	7,70	105,52	112,63	116,18	153,98	157,53	164,64	0,462	9,44	10,21	10,60	14,74	15,13	15,90
2099	48,00	407,07	435,50	449,72	601,09	615,31	643,75	7,70	105,17	111,49	114,65	148,28	151,44	157,76	0,462	9,42	10,10	10,44	14,06	14,40	15,08
2100	48,00	405,65	431,53	444,46	582,19	595,13	621,00	7,70	104,62	110,10	112,83	141,98	144,71	150,19	0,462	9,38	9,96	10,24	13,29	13,58	14,15
2101	48,00	403,62	426,87	438,50	562,26	573,88	597,13	7,70	103,79	108,42	110,73	135,35	137,67	142,29	0,462	9,32	9,78	10,01	12,48	12,71	13,17
2102	48,00	400,93	421,60	431,94	541,95	552,28	572,95	7,70	102,59	106,42	108,33	128,70	130,62	134,45	0,462	9,20	9,56	9,74	11,64	11,82	12,18
2103	48,00	397,51	415,73	424,84	521,82	530,93	549,15	7,70	100,83	103,98	105,56	122,34	123,91	127,07	0,462	9,00	9,27	9,41	10,85	10,98	11,25
2104	48,00	393,32	409,31	417,31	502,43	510,43	526,42	7,70	98,28	100,97	102,31	116,59	117,94	120,62	0,462	8,64	8,86	8,98	10,16	10,27	10,50
2105	48,00	388,14	402,22	409,26	484,23	491,27	505,35	7,70	94,73	97,22	98,47	111,75	113,00	115,50	0,462	8,06	8,29	8,41	9,64	9,76	9,99
2106	48,00	381,44	394,06	400,37	467,52	473,83	486,44	7,70	90,22	92,80	94,09	107,85	109,14	111,73	0,462	7,33	7,61	7,75	9,25	9,39	9,68
2107	48,00	372,68	384,42	390,29	452,76	458,63	470,37	7,70	85,15	88,01	89,45	104,69	106,12	108,99	0,462	6,58	6,92	7,10	8,93	9,11	9,45
2108	48,00	361,37	372,94	378,73	440,33	446,11	457,69	7,70	79,97	83,21	84,82	102,03	103,65	106,89	0,462	5,87	6,27	6,48	8,65	8,85	9,26
2109	48,00	347,48	359,61	365,68	430,28	436,35	448,48	7,70	74,99	78,61	80,43	99,71	101,52	105,15	0,462	5,22	5,69	5,92	8,38	8,61	9,07
2110	48,00	331,57	344,87	351,52	422,32	428,97	442,27	7,70	70,37	74,36	76,36	97,63	99,62	103,62	0,462	4,66	5,17	5,43	8,13	8,38	8,89
2111	48,00	314,58	329,44	336,87	415,95	423,38	438,23	7,70	66,20	70,53	72,69	95,72	97,89	102,21	0,462	4,19	4,73	5,00	7,89	8,16	8,70

Anhang 5-4: Tabellarische Zusammenfassung der in Kapitel 5.2.2.4 berechneten und in Abbildung 5-19 dargestellten Prognosewerte und der zugrunde liegenden technologiebereinigten Neuinstallationen für die Bundesländer Sachsen und Thüringen. Die farbliche Zuordnung erfolgt in Anlehnung an die entsprechende Abbildungslegende.

Regionale Altmodulprognosen in [MW_p]

Jahr	Sachsen							Thüringen						
	tech.-bereinigte Neuinstallationen	Untere Kante 99% Konfi.-interv.	Untere Kante 95% Konfi.-interv.	Untere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 95% Konfi.-interv.	Obere Kante 99% Konfi.-interv.	technologiebereinigte Neuinstallationen	Untere Kante 99% Konfi.-interv.	Untere Kante 95% Konfi.-interv.	Untere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 95% Konfi.-interv.	Obere Kante 99% Konfi.-interv.
1990	0,0	0,00						0,0	0,00					
1991	0,0	0,00						0,0	0,00					
1992	0,1	0,00						0,1	0,00					
1993	0,2	0,01						0,2	0,01					
1994	0,2	0,01						0,2	0,01					
1995	0,2	0,01						0,2	0,01					
1996	0,2	0,01						0,2	0,01					
1997	0,2	0,01						0,2	0,01					
1998	0,2	0,01						0,2	0,01					
1999	0,2	0,01						0,2	0,01					
2000	0,2	0,01						0,2	0,01					
2001	0,2	0,01						0,2	0,01					
2002	0,9	0,03						0,9	0,03					
2003	0,0	0,01						0,9	0,03					
2004	9,1	0,26						2,7	0,09					
2005	12,7	0,41						8,2	0,25					
2006	20,7	0,69						14,4	0,47					
2007	40,0	1,32						18,3	0,64					
2008	61,3	2,11						35,8	1,21					
2009	97,5	3,37						52,0	1,82					
2010	207,3	6,85						144,5	4,62					
2011	314,8	10,77						193,6	6,65					
2012	385,3	14,04						314,8	10,84					
2013	132,8	13,83						128,4	7,38					
2014	66,6	12,53						71,1	6,41					
2015	47,0	11,67						73,1	6,05					
2016	59,3	10,88						59,3	5,36					
2017	58,3	9,71						58,3	4,42					
2018	57,3	9,63						57,3	4,34					
2019	56,2	9,63						56,2	4,34					
2020	55,2	9,66						55,2	4,34					
2021	55,2	9,68						55,2	4,36					
2022	55,2	9,71						55,2	4,39					
2023	55,2	9,75						55,2	4,43					
2024	31,8	9,48						31,8	4,16					
2025	4,6	9,15						4,6	3,82					
2026	4,6	9,17						4,6	3,80					
2027	4,6	9,30						4,6	3,86					
2028	4,6	8,84	9,02	9,12	10,11	10,20	10,39	4,6	3,56	3,66	3,72	4,28	4,33	4,43
2029	4,6	8,82	9,15	9,31	11,06	11,23	11,56	4,6	3,55	3,73	3,82	4,79	4,88	5,07
2030	4,6	8,84	9,42	9,72	12,83	13,12	13,71	4,6	3,54	3,88	4,05	5,84	6,01	6,35
2031	4,6	8,89	9,92	10,43	15,91	16,43	17,46	4,6	3,54	4,16	4,47	7,74	8,05	8,66
2032	4,6	9,14	10,84	11,69	20,76	21,61	23,31	4,6	3,62	4,69	5,22	10,93	11,46	12,53
2033	4,6	10,10	12,51	13,72	26,58	27,79	30,21	4,6	4,16	5,73	6,51	14,88	15,66	17,23
2034	4,6	11,83	14,89	16,42	32,70	34,23	37,29	4,6	5,26	7,28	8,28	19,01	20,02	22,03
2035	4,6	14,09	17,76	19,60	39,17	41,01	44,69	4,6	6,75	9,19	10,41	23,40	24,62	27,06
2036	4,6	16,74	21,02	23,16	45,94	48,08	52,35	4,6	8,52	11,38	12,81	28,01	29,44	32,30
2037	4,6	19,76	24,61	27,03	52,81	55,24	60,08	4,6	10,54	13,79	15,42	32,74	34,37	37,63
2038	4,6	23,18	28,51	31,18	59,57	62,24	67,57	4,6	12,82	16,43	18,24	37,45	39,26	42,87
2039	4,6	27,04	32,74	35,58	65,88	68,73	74,42	4,6	15,43	19,31	21,25	41,91	43,85	47,73
2040	4,6	31,39	37,26	40,20	71,44	74,38	80,25	4,6	18,38	22,42	24,44	45,91	47,93	51,97
2041	4,6	36,19	42,02	44,94	75,99	78,91	84,74	4,6	21,70	25,74	27,76	49,28	51,30	55,34
2042	4,6	41,27	46,86	49,65	79,37	82,16	87,75	4,6	25,29	29,18	31,13	51,88	53,83	57,72
2043	4,6	46,33	51,49	54,08	81,57	84,15	89,31	4,6	28,97	32,60	34,41	53,69	55,50	59,12
2044	4,6	50,81	55,50	57,84	82,77	85,12	89,80	4,6	32,42	35,70	37,35	54,83	56,47	59,75
2045	4,6	53,92	58,25	60,41	83,41	85,57	89,90	4,6	35,10	38,10	39,60	55,58	57,08	60,08
2046	4,6	54,86	59,13	61,26	84,00	86,14	90,41	4,6	36,39	39,31	40,78	56,34	57,80	60,73
2047	4,6	53,35	57,95	60,26	84,77	87,07	91,68	4,6	35,97	39,11	40,68	57,37	58,94	62,08
2048	4,6	49,98	55,19	57,79	85,50	88,11	93,31	4,6	34,17	37,75	39,54	58,58	60,37	63,95
2049	4,6	45,71	51,59	54,52	85,81	88,74	94,62	4,6	31,64	35,75	37,80	59,69	61,75	65,86
2050	4,6	41,35	47,81	51,04	85,41	88,64	95,10	4,6	28,99	33,61	35,91	60,49	62,80	67,42

Jahr	Sachsen							Thüringen						
	tech.-bereinigte Neuinstallationen	Untere Kante 99% Konfi.-interv.	Untere Kante 95% Konfi.-interv.	Untere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 95% Konfi.-interv.	Obere Kante 99% Konfi.-interv.	tech.-bereinigte Neuinstallationen	Untere Kante 99% Konfi.-interv.	Untere Kante 95% Konfi.-interv.	Untere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 90% Konfi.-interv.	Obere Kante 95% Konfi.-interv.	Obere Kante 99% Konfi.-interv.
2051	4,6	37,48	44,34	47,77	84,25	87,68	94,53	4,6	26,66	31,68	34,19	60,89	63,40	68,42
2052	4,6	34,47	41,49	45,00	82,39	85,90	92,93	4,6	24,93	30,21	32,84	60,92	63,55	68,83
2053	4,6	32,45	39,43	42,91	80,02	83,51	90,48	4,6	23,94	29,32	32,01	60,65	63,34	68,72
2054	4,6	31,45	38,18	41,55	77,38	80,75	87,48	4,6	23,69	29,05	31,72	60,20	62,88	68,23
2055	4,6	31,37	37,72	40,89	74,69	77,86	84,21	4,6	24,16	29,37	31,97	59,68	62,29	67,50
2056	4,6	32,05	37,92	40,86	72,13	75,06	80,94	4,6	25,22	30,20	32,69	59,16	61,65	66,62
2057	4,6	33,31	38,66	41,33	69,80	72,47	77,82	4,6	26,77	31,44	33,78	58,63	60,97	65,64
2058	4,6	34,98	39,78	42,17	67,70	70,10	74,90	4,6	28,67	32,97	35,13	58,05	60,20	64,51
2059	4,6	36,89	41,12	43,24	65,78	67,89	72,13	4,6	30,79	34,68	36,62	57,31	59,25	63,14
2060	4,6	38,89	42,56	44,39	63,91	65,75	69,41	4,6	33,03	36,44	38,14	56,30	58,00	61,41
2061	4,6	40,84	43,94	45,49	62,00	63,55	66,65	4,6	35,25	38,14	39,58	54,92	56,36	59,24
2062	4,6	42,57	45,12	46,39	59,96	61,23	63,78	4,6	37,33	39,65	40,80	53,12	54,28	56,59
2063	4,6	43,87	45,92	46,94	57,81	58,83	60,88	4,6	39,07	40,81	41,69	50,97	51,84	53,58
2064	4,6	44,42	46,07	46,89	55,68	56,50	58,15	4,6	40,12	41,37	41,99	48,65	49,28	50,53
2065	4,6	43,78	45,25	45,99	53,84	54,57	56,05	4,6	39,75	40,76	41,27	46,66	47,17	48,18
2066	4,6	41,73	43,30	44,09	52,44	53,23	54,80	4,6	37,39	38,57	39,15	45,43	46,02	47,19
2067	4,6	38,66	40,51	41,44	51,30	52,22	54,08	4,6	33,80	35,38	36,16	44,55	45,34	46,92
2068	4,6	35,11	37,31	38,41	50,14	51,24	53,44	4,6	29,85	31,86	32,86	43,55	44,56	46,56
2069	4,6	31,49	34,02	35,29	48,78	50,05	52,59	4,6	25,95	28,35	29,54	42,29	43,49	45,88
2070	4,6	28,05	30,82	32,21	46,97	48,36	51,13	4,6	22,31	24,98	26,31	40,51	41,85	44,51
2071	4,6	24,95	27,86	29,31	44,78	46,23	49,14	4,6	19,09	21,92	23,34	38,43	39,85	42,69
2072	4,6	22,33	25,28	26,75	42,42	43,89	46,83	4,6	16,34	19,21	20,64	35,91	37,35	40,22
2073	4,6	20,68	23,70	25,21	41,28	42,78	45,80	4,6	14,47	17,38	18,84	34,34	35,80	38,71
2074	4,6	19,78	22,76	24,26	40,15	41,64	44,63	4,6	13,30	16,15	17,58	32,75	34,17	37,02
2075	4,6	19,60	22,46	23,89	39,10	40,53	43,39	4,6	12,79	15,49	16,84	31,20	32,55	35,25
2076	4,6	20,09	22,74	24,07	38,20	39,53	42,18	4,6	12,87	15,35	16,59	29,79	31,03	33,51
2077	4,6	21,16	23,55	24,75	37,52	38,72	41,11	4,6	13,46	15,67	16,78	28,56	29,67	31,89
2078	4,6	22,71	24,82	25,87	37,09	38,15	40,25	4,6	14,45	16,37	17,34	27,58	28,55	30,47
2079	4,6	24,66	26,47	27,37	36,96	37,86	39,66	4,6	15,77	17,40	18,21	26,87	27,69	29,32
2080	4,6	26,93	28,43	29,18	37,15	37,89	39,39	4,6	17,36	18,69	19,36	26,46	27,13	28,46
2081	4,6	29,41	30,62	31,23	37,68	38,28	39,49	4,6	19,14	20,20	20,73	26,36	26,89	27,95
2082	4,6	31,91	32,89	33,38	38,61	39,10	40,08	4,6	21,02	21,83	22,24	26,59	27,00	27,82
2083	4,6	34,16	35,02	35,45	40,06	40,49	41,36	4,6	22,80	23,45	23,77	27,22	27,55	28,20
2084	4,6	35,86	36,78	37,24	42,12	42,58	43,50	4,6	24,21	24,82	25,13	28,39	28,69	29,30
2085	4,6	37,06	38,17	38,73	44,69	45,24	46,36	4,6	25,13	25,85	26,22	30,08	30,44	31,17
2086	4,6	37,94	39,35	40,05	47,51	48,22	49,62	4,6	25,74	26,68	27,14	32,11	32,58	33,51
2087	4,6	38,66	40,39	41,25	50,41	51,27	52,99	4,6	26,23	27,41	28,00	34,29	34,88	36,06
2088	4,6	39,28	41,32	42,35	53,23	54,25	56,30	4,6	26,67	28,11	28,83	36,49	37,21	38,65
2089	4,6	39,81	42,17	43,34	55,86	57,04	59,39	4,6	27,06	28,76	29,61	38,64	39,48	41,18
2090	4,6	40,27	42,90	44,21	58,21	59,52	62,15	4,6	27,43	29,37	30,34	40,65	41,62	43,56
2091	4,6	40,66	43,52	44,96	60,19	61,62	64,49	4,6	27,77	29,92	31,00	42,49	43,57	45,72
2092	4,6	40,99	44,04	45,56	61,76	63,28	66,33	4,6	28,07	30,42	31,60	44,09	45,27	47,62
2093	4,6	41,21	44,38	45,96	62,82	64,41	67,57	4,6	28,30	30,81	32,06	45,39	46,64	49,15
2094	4,6	41,41	44,64	46,26	63,44	65,06	68,29	4,6	28,54	31,16	32,47	46,43	47,74	50,36
2095	4,6	41,58	44,81	46,42	63,61	65,22	68,45	4,6	28,76	31,46	32,80	47,17	48,52	51,22
2096	4,6	41,71	44,88	46,46	63,33	64,92	68,09	4,6	28,97	31,71	33,08	47,64	49,01	51,75
2097	4,6	41,81	44,86	46,39	62,67	64,20	67,25	4,6	29,19	31,93	33,29	47,84	49,21	51,94
2098	4,6	41,87	44,77	46,23	61,66	63,12	66,02	4,6	29,42	32,11	33,46	47,78	49,13	51,82
2099	4,6	41,91	44,62	45,97	60,39	61,74	64,45	4,6	29,66	32,27	33,58	47,49	48,80	51,41
2100	4,6	41,91	44,40	45,65	58,91	60,16	62,65	4,6	29,92	32,42	33,67	47,00	48,25	50,75
2101	4,6	41,88	44,14	45,27	57,29	58,42	60,68	4,6	30,20	32,56	33,74	46,32	47,50	49,86
2102	4,6	41,80	43,82	44,83	55,58	56,59	58,61	4,6	30,50	32,70	33,79	45,47	46,57	48,76
2103	4,6	41,68	43,46	44,35	53,84	54,73	56,51	4,6	30,84	32,84	33,84	44,49	45,49	47,49
2104	4,6	41,50	43,06	43,84	52,12	52,90	54,45	4,6	31,21	32,99	33,89	43,38	44,27	46,06
2105	4,6	41,26	42,61	43,28	50,46	51,13	52,48	4,6	31,61	33,16	33,93	42,18	42,95	44,50
2106	4,6	40,91	42,08	42,66	48,89	49,47	50,64	4,6	32,00	33,30	33,95	40,88	41,54	42,84
2107	4,6	40,36	41,41	41,93	47,46	47,98	49,02	4,6	32,34	33,39	33,92	39,55	40,08	41,13
2108	4,6	39,56	40,54	41,03	46,24	46,73	47,71	4,6	32,52	33,35	33,77	38,24	38,66	39,50
2109	4,6	38,44	39,44	39,94	45,27	45,77	46,77	4,6	32,34	33,04	33,38	37,09	37,44	38,14
2110	4,6	37,05	38,15	38,69	44,52	45,06	46,16	4,6	31,56	32,25	32,60	36,29	36,64	37,33
2111	4,6	35,48	36,72	37,34	43,94	44,56	45,80	4,6	30,18	31,01	31,42	35,84	36,25	37,08

Anhang 5-5: Tabellarische Zusammenfassung der nach Kapitel 5.4.3.2 berechneten und in Abbildung 5-29 zusammengefassten einzelnen Transportleistungen in Tonnenkilometer.

Angaben in [t·km]	Produktions-ausschuss	Knotenmenge r																			
Knotenmenge q		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21
M1	**67,51**	0	12.017,14	12.017,14	14.582,59	5.819,53	2.389,92	1.465,01	8.574,02	9.181,63	5.218,68	3.929,20	15.595,27	20.591,16	8.371,49	6.886,22	10.194,31	10.464,36	16.810,49	2.855,76	6.602,67	10.734,41
M2	**84,39**	15.021,42	0	7.552,91	30.296,01	21.688,23	17.637,51	14.515,08	27.848,70	27.511,14	10.633,14	19.325,31	31.477,47	15.949,71	19.747,26	12.574,11	11.139,48	5.493,79	11.223,87	17.975,07	6.590,86	17.806,29
M3	**16,88**	3.004,28	1.510,58	0	5.097,16	4.320,77	3.510,62	2.903,02	4.607,69	4.540,18	2.481,07	3.848,18	5.519,11	1.991,60	3.004,28	2.514,82	1.448,13	491,15	1.039,68	3.578,14	1.478,51	2.784,87
M4	**29,54**	6.379,88	10.603,60	8.920,02	0	4.253,26	7.354,59	6.822,93	2.670,10	2.557,86	8.388,37	5.346,11	744,32	12.936,99	4.135,11	5.759,62	7.443,20	8.831,41	11.282,94	5.316,57	9.097,24	4.696,30
M5	**75,95**	6.546,98	19.519,41	19.443,46	10.936,94	0	9.038,17	7.671,05	4.230,47	4.853,27	11.240,75	3.273,49	12.076,21	29.165,18	8.278,66	10.481,24	17.468,73	17.848,49	24.911,93	3.827,93	13.443,33	13.899,03
M6	**9,49**	336,08	1.984,22	1.974,73	2.363,97	1.129,77	0	479,44	1.519,02	1.594,97	689,26	857,30	2.496,89	3.161,46	1.481,04	1.319,65	1.699,40	1.746,87	2.629,80	722,48	1.205,72	1.832,32
M7	**50,63**	1.098,76	8.709,05	8.709,05	11.696,45	5.114,03	2.557,02	0	7.190,03	7.645,73	3.670,97	3.706,41	12.455,96	15.190,20	7.038,13	3.949,45	7.392,56	7.645,73	12.354,70	2.901,33	4.708,96	8.810,32
M8	**15,19**	1.929,16	5.012,77	4.146,92	1.373,19	846,09	2.430,43	2.157,01	0	145,83	2.977,28	1.519,02	1.594,97	6.182,41	1.655,73	2.506,38	3.372,22	4.070,97	5.331,76	1.402,06	3.326,65	1.944,35
M9	**8,44**	1.147,70	2.751,11	2.270,09	730,82	539,25	1.417,75	1.274,29	81,01	0	1.713,12	970,49	852,34	3.400,92	886,10	1.350,24	1.831,26	2.227,90	2.928,33	838,84	1.907,21	1.046,44
M10	**3,8**	293,55	478,49	558,24	1.078,50	562,04	275,70	275,32	744,32	770,90	0	489,88	1.143,06	1.036,73	706,34	377,10	501,28	470,90	824,07	429,12	260,13	835,46
M11	**421,95**	24.557,49	96.626,55	96.204,60	76.372,95	18.186,05	38.102,09	30.886,74	42.195,00	48.524,25	54.431,55	0	88.609,50	149.792,25	48.524,25	56.541,30	84.811,95	86.921,70	126.163,05	9.156,32	62.870,55	63.292,50
M12	**151,9**	35.089,36	56.659,45	49.671,95	3.827,93	24.152,42	39.950,23	37.367,89	15.949,71	15.342,10	45.722,50	31.899,42	0	68.659,70	23.392,91	31.747,52	40.405,93	47.393,42	60.153,19	29.468,99	48.760,54	26.279,05
M13	**126,59**	38.608,43	23.924,57	14.937,03	55.444,23	48.608,64	42.152,81	37.975,50	51.520,10	51.013,76	34.557,71	44.937,68	57.216,42	0	39.874,28	34.810,88	26.836,02	18.354,83	9.392,61	42.912,32	27.089,19	36.962,82
SUMME		**134.013**	**239.797**	**226.406**	**213.801**	**135.220**	**166.817**	**143.793**	**167.130**	**173.682**	**181.724**	**120.102**	**229.782**	**328.058**	**167.096**	**170.819**	**214.544**	**211.962**	**285.046**	**121.385**	**187.342**	**190.924**

Anhang 5-6: Tabellarische Zusammenfassung der nach Kapitel 5.4.3.2 berechneten und in Abbildung 5-32 zusammengefassten Kosten in € für inklusive der Angabe über die Anzahl der Fahrten mit der zulässigen Nutzlast N_i.

Angaben in [€]	Knotenmenge q	Frachtrate in [€/Fzg.-km]	Knotenmenge r R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	Anzahl Fahrten mit Nutzlast N_i
	M1	2,00	0	2.848	2.848	3.456	1.379,2	566,4	347,2	2.032	2.176	1.236,8	931,2	3.696	4.880	1.984	1.632	2.416	2.480	3.984	676,8	1.564,8	2.544	N_{28} = 2
		2,20	0	3.132,8	3.132,8	3.801,6	1.517,12	623,04	381,92	2.235,2	2.393,6	1.360,48	1.024,32	4.065,6	5.368	2.182,4	1.795,2	2.657,6	2.728	4.382,4	744,48	1.721,28	2.798,4	$N_{5,5}$ = 2
		2,50	0	3.560	3.560	4.320	1.724	708	434	2.540	2.720	1.546	1.164	4.620	6.100	2.480	2.040	3.020	3.100	4.980	846	1.956	3.180	
	M2	2,00	2.136	0	1.074	4.308	3.084	2.508	2.064	3.960	3.912	1.512	2.748	4.476	2.268	2.808	1.788	1.584	781,2	1.596	2.556	937,2	2.532	N_{28} = 3
		2,20	2.349,6	0	1.181,4	4.738,8	3.392,4	2.758,8	2.270,4	4.356	4.303,2	1.663,2	3.022,8	4.923,6	2.494,8	3.088,8	1.966,8	1.742,4	859,32	1.755,6	2.811,6	1.030,92	2.785,2	$N_{5,5}$ = 0
		2,50	2.670	0	1.342,5	5.385	3.855	3.135	2.580	4.950	4.890	1.890	3.435	5.595	2.835	3.510	2.235	1.980	976,5	1.995	3.195	1.171,5	3.165	
	M3	2,00	712	358	0	1.208	1.024	832	688	1.092	1.076	588	912	1.308	472	712	596	343,2	116,4	246,4	848	350,4	660	N_{28} = 1
		2,20	783,2	393,8	0	1.328,8	1.126,4	915,2	756,8	1.201,2	1.183,6	646,8	1.003,2	1.438,8	519,2	783,2	655,6	377,52	128,04	271,04	932,8	385,44	726	$N_{5,5}$ = 0
		2,50	890	447,5	0	1.510	1.280	1.040	860	1.365	1.345	735	1.140	1.635	590	890	745	429	145,5	308	1.060	438	825	
	M4	2,00	864	1436	1.208	0	576	996	924	361,6	346,4	1.136	724	100,8	1.752	560	780	1.008	1.196	1.528	720	1.232	636	N_{28} = 1
		2,20	950,4	1.579,6	1.328,8	0	633,6	1.095,6	1.016,4	397,76	381,04	1.249,6	796,4	110,88	1.927,2	616	858	1.108,8	1.315,6	1.680,8	792	1.355,2	699,6	$N_{5,5}$ = 0
		2,50	1.080	1.795	1.510	0	720	1.245	1.155	452	433	1.420	905	126	2.190	700	975	1.260	1.495	1.910	900	1.540	795	
	M5	2,00	1.034,4	3.084	3.072	1.728	0	1.428	1.212	668,4	766,8	1.776	517,2	1.908	4.608	1.308	1.656	2.760	2.820	3.936	604,8	2.124	2.196	N_{28} = 3
		2,20	1.137,84	3.392,4	3.379,2	1.900,8	0	1.570,8	1.333,2	735,24	843,48	1.953,6	568,92	2.098,8	5.068,8	1.438,8	1.821,6	3.036	3.102	4.329,6	665,28	2.336,4	2.415,6	$N_{5,5}$ = 0
		2,50	1.293	3.855	3.840	2.160	0	1.785	1.515	835,5	958,5	2.220	646,5	2.385	5.760	1.635	2.070	3.450	3.525	4.920	756	2.655	2.745	
	M6	2,00	283,2	1.672	1.664	1.992	952	0	404	1.280	1.344	580,8	722,4	2.104	2.664	1.248	1.112	1.432	1.472	2.216	608,8	1.016	1.544	N_{28} = 0
		2,20	311,52	1.839,2	1.830,4	2.191,2	1.047,2	0	444,4	1.408	1.478,4	638,88	794,64	2.314,4	2.930,4	1.372,8	1.223,2	1.575,2	1.619,2	2.437,6	669,68	1.117,6	1.698,4	$N_{5,5}$ = 2
		2,50	354	2.090	2.080	2.490	1.190	0	505	1.600	1.680	726	903	2.630	3.330	1.560	1.390	1.790	1.840	2.770	761	1.270	1.930	
	M7	2,00	173,6	1.376	1.376	1.848	808	404	0	1.136	1.208	580	585,6	1.968	2.400	1.112	624	1.168	1.208	1.952	458,4	744	1.392	N_{28} = 2
		2,20	190,96	1.513,6	1.513,6	2.032,8	888,8	444,4	0	1.249,6	1.328,8	638	644,16	2.164,8	2.640	1.223,2	686,4	1.284,8	1.328,8	2.147,2	504,24	818,4	1.531,2	$N_{5,5}$ = 0
		2,50	217	1.720	1.720	2.310	1.010	505	0	1.420	1.510	725	732	2.460	3.000	1.390	780	1.460	1.510	2.440	573	930	1.740	
	M8	2,00	508	1.320	1.092	361,6	222,8	640	568	0	38,4	784	400	420	1.628	436	660	888	1.072	1.404	369,2	876	512	N_{28} = 1
		2,20	558,8	1.452	1.201,2	397,76	245,08	704	624,8	0	42,24	862,4	440	462	1.790,8	479,6	726	976,8	1.179,2	1.544,4	406,12	963,6	563,2	$N_{5,5}$ = 0
		2,50	635	1.650	1.365	452	278,5	800	710	0	48	980	500	525	2.035	545	825	1.110	1.340	1.755	461,5	1.095	640	
	M9	2,00	1.088	2.608	2.152	692,8	511,2	1.344	1.208	76,8	0	1.624	920	808	3.224	840	1.280	1.736	2.112	2.776	795,2	1.808	992	N_{28} = 0
		2,20	1.196,8	2.868,8	2.367,2	762,08	562,32	1.478,4	1.328,8	84,48	0	1.786,4	1.012	888,8	3.546,4	924	1.408	1.909,6	2.323,2	3.053,6	874,72	1.988,8	1.091,2	$N_{5,5}$ = 2
		2,50	1.360	3.260	2.690	866	639	1.680	1.510	96	0	2.030	1.150	1.010	4.030	1.050	1.600	2.170	2.640	3.470	994	2.260	1.240	
	M10	2,00	309,2	504	588	1.136	592	290,4	290	784	812	0	516	1.204	1.092	744	397,2	528	496	868	452	274	880	N_{28} = 0
		2,20	340,12	554,4	646,8	1.249,6	651,2	319,44	319	862,4	893,2	0	567,6	1.324,4	1.201,2	818,4	436,92	580,8	545,6	954,8	497,2	301,4	968	$N_{5,5}$ = 1
		2,50	386,5	630	735	1.420	740	363	362,5	980	1.015	0	645	1.505	1.365	930	496,5	660	620	1.085	565	342,5	1.100	
	M11	2,00	3.724,8	14.656	14.592	11.584	2.758,4	5.779,2	4.684,8	6.400	7.360	8.256	0	13.440	22.720	7.360	8.576	12.864	13.184	19.136	1.388,8	9.536	9.600	N_{28} = 15
		2,20	4.097,28	16.121,6	16.051,2	12.742,4	3.034,24	6.357,12	5.153,28	7.040	8.096	9.081,6	0	14.784	24.992	8.096	9.433,6	14.150,4	14.502,4	21.049,6	1.527,68	10.489,6	10.560	$N_{5,5}$ = 1
		2,50	4.656	18.320	18.240	14.480	3.448	7.224	5.856	8.000	9.200	10.320	0	16.800	28.400	9.200	10.720	16.080	16.480	23.920	1.736	11.920	12.000	
	M12	2,00	6.468	10.444	9.156	705,6	4.452	7.364	6.888	2.940	2.828	8.428	5.880	0	12.656	4.312	5.852	7.448	8.736	11.088	5.432	8.988	4.844	N_{28} = 5
		2,20	7.114,8	11.488,4	10.071,6	776,16	4.897,2	8.100,4	7.576,8	3.234	3.110,8	9.270,8	6.468	0	13.921,6	4.743,2	6.437,2	8.192,8	9.609,6	12.196,8	5.975,2	9.886,8	5.328,4	$N_{5,5}$ = 2
		2,50	8.085	13.055	11.445	882	5.565	9.205	8.610	3.675	3.535	10.535	7.350	0	15.820	5.390	7.315	9.310	10.920	13.860	6.790	11.235	6.055	
	M13	2,00	8.540	5.292	3.304	12.264	10.752	9.324	8.400	11.396	11.284	7.644	9.940	12.656	0	8.820	7.700	5.936	4.060	2.077,6	9.492	5.992	8.176	N_{28} = 4
		2,20	9.394	5.821,2	3.634,4	13.490,4	11.827,2	10.256,4	9.240	12.535,6	12.412,4	8.408,4	10.934	13.921,6	0	9.702	8.470	6.529,6	4.466	2.285,36	10.441,2	6.591,2	8.993,6	$N_{5,5}$ = 3
		2,50	10.675	6.615	4.130	15.330	13.440	11.655	10.500	14.245	14.105	9.555	12.425	15.820	0	1.1025	9.625	7.420	5.075	2.597	1.1865	7.490	10.220	
	SUMME	2,00	25.841,2	45.598	42.126	41.284	27.111,6	31.476	27.678	32.126,8	33.151,6	34.145,6	24.796,4	44.088,8	60.364	32.244	32.653,2	40.111,2	39.733,6	52.808	24.402	35.442,4	36.508	
		2,20	28.425,32	50.157,8	46.338,6	45.412,4	29.822,76	34.623,6	30.445,8	35.339,48	36.466,76	37.560,16	27.276,04	48.497,68	66.400,4	35.468,4	35.918,52	44.122,32	43.706,96	58.088,8	26.842,2	38.986,64	40.158,8	
		2,50	32.301,5	56.997,5	52.657,5	51.605	33.889,5	39.345	34.597,5	40.158,5	41.439,5	42.682	30.995,5	55.111	75.455	40.305	40.816,5	50.139	49.667	66.010	30.502,5	44.303	45.635	

Anhang 5-7: Entfernungsmatrix der Knotenmenge b nach Kapitel 5.4.5.2.

Angaben in [km]	Produktionsausschuss in [t/d]	Knotenmenge b																												
Knotenmenge q		**R1**	**R2**	**R3**	**R4**	**R5**	**R6**	**R7**	**R8**	**R9**	**R10**	**R11**	**R12**	**R13**	**R14**	**R15**	**R16**	**R17**	**R18**	**R19**	**R20**	**R21**	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B7**	**B8**	**B9**
R1	**67,51**	0	178	178	216	86,2	35,4	21,7	127	136	77,3	58,2	231	305	124	102	151	155	249	42,3	97,8	159	151	89,2	132	179	122	101	198	154	104
R2	**84,39**	178	0	89,5	359	257	209	172	330	326	126	229	373	189	234	149	132	65,1	133	213	78,1	211	233	277	305	322	293	78,9	109	325	160
R3	**16,88**	178	89,5	0	302	256	208	172	273	269	147	228	327	118	178	149	85,8	29,1	61,6	212	87,6	165	186	231	259	275	292	120	37,3	325	207
R4	**29,54**	216	359	302	0	144	249	231	90,4	86,6	284	181	25,2	438	140	195	252	299	382	180	308	159	123	162	117	50,4	123	338	267	131	313
R5	**75,95**	86,2	257	256	144	0	119	101	55,7	63,9	148	43,1	159	384	109	138	230	235	328	50,4	177	183	135	69,7	59,9	107	39,3	208	252	71,7	183
R6	**9,49**	35,4	209	208	249	119	0	50,5	160	168	72,6	90,3	263	333	156	139	179	184	277	76,1	127	193	183	121	164	211	154	97,4	227	186	73,4
R7	**50,63**	21,7	172	172	231	101	50,5	0	142	151	72,5	73,2	246	300	139	78	146	151	244	57,3	93	174	166	104	147	194	137	124	193	169	117
R8	**15,19**	127	330	273	90,4	55,7	160	142	0	9,6	196	100	105	407	109	165	222	268	351	92,3	219	128	121	92,3	29,3	53	35,1	250	236	68,2	225
R9	**8,44**	136	326	269	86,6	63,9	168	151	9,6	0	203	115	101	403	105	160	217	264	347	99,4	226	124	117	88,1	26,2	48,8	42,2	257	232	77	232
R10	**3,80**	77,3	126	147	284	148	72,6	72,5	196	203	0	129	301	273	186	99,3	132	124	217	113	68,5	220	221	160	202	249	184	46,8	169	225	98,5
R11	**421,95**	58,2	229	228	181	43,1	90,3	73,2	100	115	129	0	210	355	115	134	201	206	299	21,7	149	150	135	80,9	111	159	102	179	249	122	145
R12	**151,90**	231	373	327	25,2	159	263	246	105	101	301	210	0	452	154	209	266	312	396	194	321	173	148	175	125	64,2	137	352	281	145	327
R13	**126,59**	305	189	118	438	384	333	300	407	403	273	355	452	0	315	275	212	145	74,2	339	214	292	311	355	384	400	418	246	174	451	341
R14	**0**	124	234	178	140	109	156	139	109	105	186	115	154	315	0	58,7	131	177	260	86,1	214	37,6	29,9	40,5	69,1	102	142	245	146	150	220
R15	**0**	102	149	149	195	138	139	78	165	160	99,3	134	209	275	58,7	0	64,5	127	220	74,9	89	61,8	85,7	63	105	158	174	121	130	188	191
R16	**0**	151	132	85,8	252	230	179	146	222	217	132	201	266	212	131	64,5	0	70,3	156	131	73,5	105	126	170	206	215	255	106	56,9	263	193
R17	**0**	155	65,1	29,1	299	235	184	151	268	264	124	206	312	145	177	127	70,3	0	89,2	190	65,1	150	172	216	252	261	270	97,1	54,5	302	185
R18	**0**	249	133	61,6	382	328	277	244	351	347	217	299	396	74,2	260	220	156	89,2	0	284	159	234	256	300	336	345	363	191	120	396	278
R19	**0**	42,3	213	212	180	50,4	76,1	57,3	92,3	99,4	113	21,7	194	339	86,1	74,9	131	190	284	0	133	122	114	52,6	95,4	143	91,3	164	230	118	138
R20	**0**	97,8	78,1	87,6	308	177	127	93	219	226	68,5	149	321	214	214	89	73,5	65,1	159	133	0	209	241	180	222	270	212	36,1	107	245	131
R21	**0**	159	211	165	159	183	193	174	128	124	220	150	173	292	37,6	61,8	105	150	234	122	209	0	32,4	76,6	112	121	162	241	119	170	256
B1	**0**	151	233	186	123	135	183	166	121	117	221	135	148	311	29,9	85,7	126	172	256	114	241	32,4	0	67,2	95,8	112	153	263	140	160	247
B2	**0**	89,2	277	231	162	69,7	121	104	92,3	88,1	160	80,9	175	355	40,5	63	170	216	300	52,6	180	76,6	67,2	0	53,3	127	101	211	185	134	186
B3	**0**	132	305	259	117	59,9	164	147	29,3	26,2	202	111	125	384	69,1	105	206	252	336	95,4	222	112	95,8	53,3	0	86	38,3	254	217	86,6	229
B4	**0**	179	322	275	50,4	107	211	194	53	48,8	249	159	64,2	400	102	158	215	261	345	143	270	121	112	127	86	0	84,5	301	230	93,5	276
B5	**0**	122	293	292	123	39,3	154	137	35,1	42,2	184	102	137	418	142	174	255	270	363	91,3	212	162	153	101	38,3	84,5	0	248	269	46,2	223
B6	**0**	101	78,9	120	338	208	97,4	124	250	257	46,8	179	352	246	245	121	106	97,1	191	164	36,1	241	263	211	254	301	248	0	138	278	102
B7	**0**	198	109	37,3	267	252	227	193	236	232	169	249	281	174	146	130	56,9	54,5	120	230	107	119	140	185	217	230	269	138	0	278	233
B8	**0**	154	325	325	131	71,7	186	169	68,2	77	225	122	145	451	150	188	263	302	396	118	245	170	160	134	86,6	93,5	46,2	278	278	0	250
B9	**0**	104	160	207	313	183	73,4	117	225	232	98,5	145	327	341	220	191	193	185	278	138	131	256	247	186	229	276	223	102	233	250	0

Anhang 5-8: Einzelne Kapitalwerte in € für alle betrachtungsrelevanten Kalkulationszinsätze und Investitionssummen des Szenarios kurzfristiger K_{rf}-Wert nach Kapitel 5.4.5.3: Nettogegenwartswert, S. 600.

0,1 %

Investitionssumme I_0 in € \ Betriebszeit in Jahren	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Break-even des KW in Jahren
250.000	-250.000	46.124	341.953	637.485	932.723	1.227.666	1.522.314	1.816.668	2.110.727	2.404.493	2.697.965	2.991.145	3.284.031	3.576.625	3.868.926	4.160.935	4.452.653	4.744.079	5.035.215	5.326.059	5.616.613	0,84
500.000	-500.000	-203.876	91.953	387.485	682.723	977.666	1.272.314	1.566.668	1.860.727	2.154.493	2.447.965	2.741.145	3.034.031	3.326.625	3.618.926	3.910.935	4.202.653	4.494.079	4.785.215	5.076.059	5.366.613	1,69
750.000	-750.000	-453.876	-158.047	137.485	432.723	727.666	1.022.314	1.316.668	1.610.727	1.904.493	2.197.965	2.491.145	2.784.031	3.076.625	3.368.926	3.660.935	3.952.653	4.244.079	4.535.215	4.826.059	5.116.613	2,53
1.000.000	-1.000.000	-703.876	-408.047	-112.515	182.723	477.666	772.314	1.066.668	1.360.727	1.654.493	1.947.965	2.241.145	2.534.031	2.826.625	3.118.926	3.410.935	3.702.653	3.994.079	4.285.215	4.576.059	4.866.613	3,38
1.250.000	-1.250.000	-953.876	-658.047	-362.515	-67.277	227.666	522.314	816.668	1.110.727	1.404.493	1.697.965	1.991.145	2.284.031	2.576.625	2.868.926	3.160.935	3.452.653	3.744.079	4.035.215	4.326.059	4.616.613	4,23
1.500.000	-1.500.000	-1.203.876	-908.047	-612.515	-317.277	-22.334	272.314	566.668	860.727	1.154.493	1.447.965	1.741.145	2.034.031	2.326.625	2.618.926	2.910.935	3.202.653	3.494.079	3.785.215	4.076.059	4.366.613	5,08
1.750.000	-1.750.000	-1.453.876	-1.158.047	-862.515	-567.277	-272.334	22.314	316.668	610.727	904.493	1.197.965	1.491.145	1.784.031	2.076.625	2.368.926	2.660.935	2.952.653	3.244.079	3.535.215	3.826.059	4.116.613	5,92
2.000.000	-2.000.000	-1.703.876	-1.408.047	-1.112.515	-817.277	-522.334	-227.686	66.668	360.727	654.493	947.965	1.241.145	1.534.031	1.826.625	2.118.926	2.410.935	2.702.653	2.994.079	3.285.215	3.576.059	3.866.613	6,77
2.250.000	-2.250.000	-1.953.876	-1.658.047	-1.362.515	-1.067.277	-772.334	-477.686	-183.332	110.727	404.493	697.965	991.145	1.284.031	1.576.625	1.868.926	2.160.935	2.452.653	2.744.079	3.035.215	3.326.059	3.616.613	7,62
2.500.000	-2.500.000	-2.203.876	-1.908.047	-1.612.515	-1.317.277	-1.022.334	-727.686	-433.332	-139.273	154.493	447.965	741.145	1.034.031	1.326.625	1.618.926	1.910.935	2.202.653	2.494.079	2.785.215	3.076.059	3.366.613	8,47
2.750.000	-2.750.000	-2.453.876	-2.158.047	-1.862.515	-1.567.277	-1.272.334	-977.686	-683.332	-389.273	-95.507	197.965	491.145	784.031	1.076.625	1.368.926	1.660.935	1.952.653	2.244.079	2.535.215	2.826.059	3.116.613	9,33
3.000.000	-3.000.000	-2.703.876	-2.408.047	-2.112.515	-1.817.277	-1.522.334	-1.227.686	-933.332	-639.273	-345.507	-52.035	241.145	534.031	826.625	1.118.926	1.410.935	1.702.653	1.994.079	2.285.215	2.576.059	2.866.613	10,18
3.250.000	-3.250.000	-2.953.876	-2.658.047	-2.362.515	-2.067.277	-1.772.334	-1.477.686	-1.183.332	-889.273	-595.507	-302.035	-8.855	284.031	576.625	868.926	1.160.935	1.452.653	1.744.079	2.035.215	2.326.059	2.616.613	11,03

0,5 %

Investitionssumme I_0 in € \ Betriebszeit in Jahren	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Break-even des KW in Jahren
250.000	-250.000	44.946	338.424	630.442	921.007	1.210.127	1.497.808	1.784.058	2.068.884	2.352.293	2.634.292	2.914.888	3.194.088	3.471.899	3.748.327	4.023.381	4.297.066	4.569.389	4.840.358	5.109.978	5.378.257	0,85
500.000	-500.000	-205.054	88.424	380.442	671.007	960.127	1.247.808	1.534.058	1.818.884	2.102.293	2.384.292	2.664.888	2.944.088	3.221.899	3.498.327	3.773.381	4.047.066	4.319.389	4.590.358	4.859.978	5.128.257	1,70
750.000	-750.000	-455.054	-161.576	130.442	421.007	710.127	997.808	1.284.058	1.568.884	1.852.293	2.134.292	2.414.888	2.694.088	2.971.899	3.248.327	3.523.381	3.797.066	4.069.389	4.340.358	4.609.978	4.878.257	2,55
1.000.000	-1.000.000	-705.054	-411.576	-119.558	171.007	460.127	747.808	1.034.058	1.318.884	1.602.293	1.884.292	2.164.888	2.444.088	2.721.899	2.998.327	3.273.381	3.547.066	3.819.389	4.090.358	4.359.978	4.628.257	3,41
1.250.000	-1.250.000	-955.054	-661.576	-369.558	-78.993	210.127	497.808	784.058	1.068.884	1.352.293	1.634.292	1.914.888	2.194.088	2.471.899	2.748.327	3.023.381	3.297.066	3.569.389	3.840.358	4.109.978	4.378.257	4,27
1.500.000	-1.500.000	-1.205.054	-911.576	-619.558	-328.993	-39.873	247.808	534.058	818.884	1.102.293	1.384.292	1.664.888	1.944.088	2.221.899	2.498.327	2.773.381	3.047.066	3.319.389	3.590.358	3.859.978	4.128.257	5,14
1.750.000	-1.750.000	-1.455.054	-1.161.576	-869.558	-578.993	-289.873	-2.192	284.058	568.884	852.293	1.134.292	1.414.888	1.694.088	1.971.899	2.248.327	2.523.381	2.797.066	3.069.389	3.340.358	3.609.978	3.878.257	6,01
2.000.000	-2.000.000	-1.705.054	-1.411.576	-1.119.558	-828.993	-539.873	-252.192	34.058	318.884	602.293	884.292	1.164.888	1.444.088	1.721.899	1.998.327	2.273.381	2.547.066	2.819.389	3.090.358	3.359.978	3.628.257	6,88
2.250.000	-2.250.000	-1.955.054	-1.661.576	-1.369.558	-1.078.993	-789.873	-502.192	-215.942	68.884	352.293	634.292	914.888	1.194.088	1.471.899	1.748.327	2.023.381	2.297.066	2.569.389	2.840.358	3.109.978	3.378.257	7,76
2.500.000	-2.500.000	-2.205.054	-1.911.576	-1.619.558	-1.328.993	-1.039.873	-752.192	-465.942	-181.116	102.293	384.292	664.888	944.088	1.221.899	1.498.327	1.773.381	2.047.066	2.319.389	2.590.358	2.859.978	3.128.257	8,64
2.750.000	-2.750.000	-2.455.054	-2.161.576	-1.869.558	-1.578.993	-1.289.873	-1.002.192	-715.942	-431.116	-147.707	134.292	414.888	694.088	971.899	1.248.327	1.523.381	1.797.066	2.069.389	2.340.358	2.609.978	2.878.257	9,52
3.000.000	-3.000.000	-2.705.054	-2.411.576	-2.119.558	-1.828.993	-1.539.873	-1.252.192	-965.942	-681.116	-397.707	-115.708	164.888	444.088	721.899	998.327	1.273.381	1.547.066	1.819.389	2.090.358	2.359.978	2.628.257	10,41
3.250.000	-3.250.000	-2.955.054	-2.661.576	-2.369.558	-2.078.993	-1.789.873	-1.502.192	-1.215.942	-931.116	-647.707	-365.708	-85.112	194.088	471.899	748.327	1.023.381	1.297.066	1.569.389	1.840.358	2.109.978	2.378.257	11,30

1 %

Investitionssumme I_0 in € \ Betriebszeit in Jahren	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Break-even des KW in Jahren
250.000	-250.000	-43.485	334.065	621.768	906.622	1.188.656	1.467.897	1.744.374	2.018.113	2.289.142	2.557.487	2.823.176	3.086.234	3.346.687	3.604.562	3.859.884	4.112.677	4.362.968	4.610.781	4.856.139	5.099.069	0,85
500.000	-500.000	-206.515	84.065	371.768	656.622	938.656	1.217.897	1.494.374	1.768.113	2.039.142	2.307.487	2.573.176	2.836.234	3.096.687	3.354.562	3.609.884	3.862.677	4.112.968	4.360.781	4.606.139	4.849.069	1,71
750.000	-750.000	-456.515	-165.935	121.768	406.622	688.656	967.897	1.244.374	1.518.113	1.789.142	2.057.487	2.323.176	2.586.234	2.846.687	3.104.562	3.359.884	3.612.677	3.862.968	4.110.781	4.356.139	4.599.069	2,58
1.000.000	-1.000.000	-706.515	-415.935	-128.232	156.622	438.656	717.897	994.374	1.268.113	1.539.142	1.807.487	2.073.176	2.336.234	2.596.687	2.854.562	3.109.884	3.362.677	3.612.968	3.860.781	4.106.139	4.349.069	3,45
1.250.000	-1.250.000	-956.515	-665.935	-378.232	-93.378	188.656	467.897	744.374	1.018.113	1.289.142	1.557.487	1.823.176	2.086.234	2.346.687	2.604.562	2.859.884	3.112.677	3.362.968	3.610.781	3.856.139	4.099.069	4,33
1.500.000	-1.500.000	-1.206.515	-915.935	-628.232	-343.378	-61.344	217.897	494.374	768.113	1.039.142	1.307.487	1.573.176	1.836.234	2.096.687	2.354.562	2.609.884	2.862.677	3.112.968	3.360.781	3.606.139	3.849.069	5,22
1.750.000	-1.750.000	-1.456.515	-1.165.935	-878.232	-593.378	-311.344	-32.103	244.374	518.113	789.142	1.057.487	1.323.176	1.586.234	1.846.687	2.104.562	2.359.884	2.612.677	2.862.968	3.110.781	3.356.139	3.599.069	6,12
2.000.000	-2.000.000	-1.706.515	-1.415.935	-1.128.232	-843.378	-561.344	-282.103	-5.626	268.113	539.142	807.487	1.073.176	1.336.234	1.596.687	1.854.562	2.109.884	2.362.677	2.612.968	2.860.781	3.106.139	3.349.069	7,02
2.250.000	-2.250.000	-1.956.515	-1.665.935	-1.378.232	-1.093.378	-811.344	-532.103	-255.626	18.113	289.142	557.487	823.176	1.086.234	1.346.687	1.604.562	1.859.884	2.112.677	2.362.968	2.610.781	2.856.139	3.099.069	7,93
2.500.000	-2.500.000	-2.206.515	-1.915.935	-1.628.232	-1.343.378	-1.061.344	-782.103	-505.626	-231.887	39.142	307.487	573.176	836.234	1.096.687	1.354.562	1.609.884	1.862.677	2.112.968	2.360.781	2.606.139	2.849.069	8,86
2.750.000	-2.750.000	-2.456.515	-2.165.935	-1.878.232	-1.593.378	-1.311.344	-1.032.103	-755.626	-481.887	-210.858	57.487	323.176	586.234	846.687	1.104.562	1.359.884	1.612.677	1.862.968	2.110.781	2.356.139	2.599.069	9,79
3.000.000	-3.000.000	-2.706.515	-2.415.935	-2.128.232	-1.843.378	-1.561.344	-1.282.103	-1.005.626	-731.887	-460.858	-192.513	73.176	336.234	596.687	854.562	1.109.884	1.362.677	1.612.968	1.860.781	2.106.139	2.349.069	10,72
3.250.000	-3.250.000	-2.956.515	-2.665.935	-2.378.232	-2.093.378	-1.811.344	-1.532.103	-1.255.626	-981.887	-710.858	-442.513	-176.824	86.234	346.687	604.562	859.884	1.112.677	1.362.968	1.610.781	1.856.139	2.099.069	11,67

2 %

Investitionssumme I_0 in € \ Betriebszeit in Jahren	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Break-even des KW in Jahren
250.000	-250.000	40.608	325.518	604.842	878.688	1.147.165	1.410.378	1.668.430	1.921.422	2.169.453	2.412.621	2.651.021	2.884.746	3.113.889	3.338.538	3.558.783	3.774.709	3.986.402	4.193.943	4.397.415	4.596.898	0,86
500.000	-500.000	-209.392	75.518	354.842	628.688	897.165	1.160.378	1.418.430	1.671.422	1.919.453	2.162.621	2.401.021	2.634.746	2.863.889	3.088.538	3.308.783	3.524.709	3.736.402	3.943.943	4.147.415	4.346.898	1,73
750.000	-750.000	-459.392	-174.482	104.842	378.688	647.165	910.378	1.168.430	1.421.422	1.669.453	1.912.621	2.151.021	2.384.746	2.613.889	2.838.538	3.058.783	3.274.709	3.486.402	3.693.943	3.897.415	4.096.898	2,62
1.000.000	-1.000.000	-709.392	-424.482	-145.158	128.688	397.165	660.378	918.430	1.171.422	1.419.453	1.662.621	1.901.021	2.134.746	2.363.889	2.588.538	2.808.783	3.024.709	3.236.402	3.443.943	3.647.415	3.846.898	3,53
1.250.000	-1.250.000	-959.392	-674.482	-395.158	-121.312	147.165	410.378	668.430	921.422	1.169.453	1.412.621	1.651.021	1.884.746	2.113.889	2.338.538	2.558.783	2.774.709	2.986.402	3.193.943	3.397.415	3.596.898	4,45
1.500.000	-1.500.000	-1.209.392	-924.482	-645.158	-371.312	-102.835	160.378	418.430	671.422	919.453	1.162.621	1.401.021	1.634.746	1.863.889	2.088.538	2.308.783	2.524.709	2.736.402	2.943.943	3.147.415	3.346.898	5,39
1.750.000	-1.750.000	-1.459.392	-1.174.482	-895.158	-621.312	-352.835	-89.622	168.430	421.422	669.453	912.621	1.151.021	1.384.746	1.613.889	1.838.538	2.058.783	2.274.709	2.486.402	2.693.943	2.897.415	3.096.898	6,35
2.000.000	-2.000.000	-1.709.392	-1.424.482	-1.145.158	-871.312	-602.835	-339.622	-81.570	171.422	419.453	662.621	901.021	1.134.746	1.363.889	1.588.538	1.808.783	2.024.709	2.236.402	2.443.943	2.647.415	2.846.898	7,32
2.250.000	-2.250.000	-1.959.392	-1.674.482	-1.395.158	-1.121.312	-852.835	-589.622	-331.570	-78.578	169.453	412.621	651.021	884.746	1.113.889	1.338.538	1.558.783	1.774.709	1.986.402	2.193.943	2.397.415	2.596.898	8,32
2.500.000	-2.500.000	-2.209.392	-1.924.482	-1.645.158	-1.371.312	-1.102.835	-839.622	-581.570	-328.578	-80.547	162.621	401.021	634.746	863.889	1.088.538	1.308.783	1.524.709	1.736.402	1.943.943	2.147.415	2.346.898	9,33
2.750.000	-2.750.000	-2.459.392	-2.174.482	-1.895.158	-1.621.312	-1.352.835	-1.089.622	-831.570	-578.578	-330.547	-87.379	151.021	384.746	613.889	838.538	1.058.783	1.274.709	1.486.402	1.693.943	1.897.415	2.096.898	10,37
3.000.000	-3.000.000	-2.709.392	-2.424.482	-2.145.158	-1.871.312	-1.602.835	-1.339.622	-1.081.570	-828.578	-580.547	-337.379	-98.979	134.746	363.889	588.538	808.783	1.024.709	1.236.402	1.443.943	1.647.415	1.846.898	11,42
3.250.000	-3.250.000	-2.959.392	-2.674.482	-2.395.158	-2.121.312	-1.852.835	-1.589.622	-1.331.570	-1.078.578	-830.547	-587.379	-348.979	-115.254	113.889	338.538	558.783	774.709	986.402	1.193.943	1.397.415	1.596.898	12,50

Fortsetzung **Anhang 5-8.**

3 %

Investitionssumme I_0 in €	Betriebszeit in Jahren																				Break-even des KW in Jahren
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
250.000	-250.000	37.787	317.191	588.458	851.824	1.107.518	1.355.766	1.596.783	1.830.780	2.057.961	2.278.526	2.492.666	2.700.569	2.902.417	3.098.386	3.288.647	3.473.366	3.652.705	3.826.821	3.995.866	4.159.986	**0,87**
500.000	-500.000	-212.213	67.191	338.458	601.824	857.518	1.105.766	1.346.783	1.580.780	1.807.961	2.028.526	2.242.666	2.450.569	2.652.417	2.848.386	3.038.647	3.223.366	3.402.705	3.576.821	3.745.866	3.909.986	**1,76**
750.000	-750.000	-462.213	-182.809	88.458	351.824	607.518	855.766	1.096.783	1.330.780	1.557.961	1.778.526	1.992.666	2.200.569	2.402.417	2.598.386	2.788.647	2.973.366	3.152.705	3.326.821	3.495.866	3.659.986	**2,67**
1.000.000	-1.000.000	-712.213	-432.809	-161.542	101.824	357.518	605.766	846.783	1.080.780	1.307.961	1.528.526	1.742.666	1.950.569	2.152.417	2.348.386	2.538.647	2.723.366	2.902.705	3.076.821	3.245.866	3.409.986	**3,61**
1.250.000	-1.250.000	-962.213	-682.809	-411.542	-148.176	107.518	355.766	596.783	830.780	1.057.961	1.278.526	1.492.666	1.700.569	1.902.417	2.098.386	2.288.647	2.473.366	2.652.705	2.826.821	2.995.866	3.159.986	**4,58**
1.500.000	-1.500.000	-1.212.213	-932.809	-661.542	-398.176	-142.482	105.766	346.783	580.780	807.961	1.028.526	1.242.666	1.450.569	1.652.417	1.848.386	2.038.647	2.223.366	2.402.705	2.576.821	2.745.866	2.909.986	**5,57**
1.750.000	-1.750.000	-1.462.213	-1.182.809	-911.542	-648.176	-392.482	-144.234	96.783	330.780	557.961	778.526	992.666	1.200.569	1.402.417	1.598.386	1.788.647	1.973.366	2.152.705	2.326.821	2.495.866	2.659.986	**6,60**
2.000.000	-2.000.000	-1.712.213	-1.432.809	-1.161.542	-898.176	-642.482	-394.234	-153.217	80.780	307.961	528.526	742.666	950.569	1.152.417	1.348.386	1.538.647	1.723.366	1.902.705	2.076.821	2.245.866	2.409.986	**7,65**
2.250.000	-2.250.000	-1.962.213	-1.682.809	-1.411.542	-1.148.176	-892.482	-644.234	-403.217	-169.220	57.961	278.526	492.666	700.569	902.417	1.098.386	1.288.647	1.473.366	1.652.705	1.826.821	1.995.866	2.159.986	**8,74**
2.500.000	-2.500.000	-2.212.213	-1.932.809	-1.661.542	-1.398.176	-1.142.482	-894.234	-653.217	-419.220	-192.039	28.526	242.666	450.569	652.417	848.386	1.038.647	1.223.366	1.402.705	1.576.821	1.745.866	1.909.986	**9,87**
2.750.000	-2.750.000	-2.462.213	-2.182.809	-1.911.542	-1.648.176	-1.392.482	-1.144.234	-903.217	-669.220	-442.039	-221.474	-7.334	200.569	402.417	598.386	788.647	973.366	1.152.705	1.326.821	1.495.866	1.659.986	**11,04**
3.000.000	-3.000.000	-2.712.213	-2.432.809	-2.161.542	-1.898.176	-1.642.482	-1.394.234	-1.153.217	-919.220	-692.039	-471.474	-257.334	-49.431	152.417	348.386	538.647	723.366	902.705	1.076.821	1.245.866	1.409.986	**12,24**
3.250.000	-3.250.000	-2.962.213	-2.682.809	-2.411.542	-2.148.176	-1.892.482	-1.644.234	-1.403.217	-1.169.220	-942.039	-721.474	-507.334	-299.431	-97.583	98.386	288.647	473.366	652.705	826.821	995.866	1.159.986	**13,50**

5 %

Investitionssumme I_0 in €	Betriebszeit in Jahren																				Break-even des KW in Jahren
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
250.000	-250.000	32.305	301.167	557.226	801.092	1.033.345	1.254.538	1.465.199	1.665.828	1.856.903	2.038.879	2.212.190	2.377.248	2.534.446	2.684.159	2.826.742	2.962.535	3.091.863	3.215.031	3.332.335	3.444.053	**0,89**
500.000	-500.000	-217.695	51.167	307.226	551.092	783.345	1.004.538	1.215.199	1.415.828	1.606.903	1.788.879	1.962.190	2.127.248	2.284.446	2.434.159	2.576.742	2.712.535	2.841.863	2.965.031	3.082.335	3.194.053	**1,81**
750.000	-750.000	-467.695	-198.833	57.226	301.092	533.345	754.538	965.199	1.165.828	1.356.903	1.538.879	1.712.190	1.877.248	2.034.446	2.184.159	2.326.742	2.462.535	2.591.863	2.715.031	2.832.335	2.944.053	**2,78**
1.000.000	-1.000.000	-717.695	-448.833	-192.774	51.092	283.345	504.538	715.199	915.828	1.106.903	1.288.879	1.462.190	1.627.248	1.784.446	1.934.159	2.076.742	2.212.535	2.341.863	2.465.031	2.582.335	2.694.053	**3,79**
1.250.000	-1.250.000	-967.695	-698.833	-442.774	-198.908	33.345	254.538	465.199	665.828	856.903	1.038.879	1.212.190	1.377.248	1.534.446	1.684.159	1.826.742	1.962.535	2.091.863	2.215.031	2.332.335	2.444.053	**4,86**
1.500.000	-1.500.000	-1.217.695	-948.833	-692.774	-448.908	-216.655	4.538	215.199	415.828	606.903	788.879	962.190	1.127.248	1.284.446	1.434.159	1.576.742	1.712.535	1.841.863	1.965.031	2.082.335	2.194.053	**5,98**
1.750.000	-1.750.000	-1.467.695	-1.198.833	-942.774	-698.908	-466.655	-245.462	-34.801	165.828	356.903	538.879	712.190	877.248	1.034.446	1.184.159	1.326.742	1.462.535	1.591.863	1.715.031	1.832.335	1.944.053	**7,17**
2.000.000	-2.000.000	-1.717.695	-1.448.833	-1.192.774	-948.908	-716.655	-495.462	-284.801	-84.172	106.903	288.879	462.190	627.248	784.446	934.159	1.076.742	1.212.535	1.341.863	1.465.031	1.582.335	1.694.053	**8,44**
2.250.000	-2.250.000	-1.967.695	-1.698.833	-1.442.774	-1.198.908	-966.655	-745.462	-534.801	-334.172	-143.097	38.879	212.190	377.248	534.446	684.159	826.742	962.535	1.091.863	1.215.031	1.332.335	1.444.053	**9,79**
2.500.000	-2.500.000	-2.217.695	-1.948.833	-1.692.774	-1.448.908	-1.216.655	-995.462	-784.801	-584.172	-393.097	-211.121	-37.810	127.248	284.446	434.159	576.742	712.535	841.863	965.031	1.082.335	1.194.053	**11,23**
2.750.000	-2.750.000	-2.467.695	-2.198.833	-1.942.774	-1.698.908	-1.466.655	-1.245.462	-1.034.801	-834.172	-643.097	-461.121	-287.810	-122.752	34.446	184.159	326.742	462.535	591.863	715.031	832.335	944.053	**12,78**
3.000.000	-3.000.000	-2.717.695	-2.448.833	-2.192.774	-1.948.908	-1.716.655	-1.495.462	-1.284.801	-1.084.172	-893.097	-711.121	-537.810	-372.752	-215.554	-65.841	76.742	212.535	341.863	465.031	582.335	694.053	**14,46**
3.250.000	-3.250.000	-2.967.695	-2.698.833	-2.442.774	-2.198.908	-1.966.655	-1.745.462	-1.534.801	-1.334.172	-1.143.097	-961.121	-787.810	-622.752	-465.554	-315.841	-173.258	-37.465	91.863	215.031	332.335	444.053	**16,29**

8 %

Investitionssumme I_0 in €	Betriebszeit in Jahren																				Break-even des KW in Jahren
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
250.000	-250.000	24.463	278.596	513.904	731.782	933.521	1.120.316	1.293.274	1.453.421	1.601.705	1.739.005	1.866.134	1.983.847	2.092.840	2.193.760	2.287.204	2.373.726	2.453.839	2.528.018	2.596.702	2.660.299	**0,91**
500.000	-500.000	-225.537	28.596	263.904	481.782	683.521	870.316	1.043.274	1.203.421	1.351.705	1.489.005	1.616.134	1.733.847	1.842.840	1.943.760	2.037.204	2.123.726	2.203.839	2.278.018	2.346.702	2.410.299	**1,89**
750.000	-750.000	-475.537	-221.404	13.904	231.782	433.521	620.316	793.274	953.421	1.101.705	1.239.005	1.366.134	1.483.847	1.592.840	1.693.760	1.787.204	1.873.726	1.953.839	2.028.018	2.096.702	2.160.299	**2,94**
1.000.000	-1.000.000	-725.537	-471.404	-236.096	-18.218	183.521	370.316	543.274	703.421	851.705	989.005	1.116.134	1.233.847	1.342.840	1.443.760	1.537.204	1.623.726	1.703.839	1.778.018	1.846.702	1.910.299	**4,09**
1.250.000	-1.250.000	-975.537	-721.404	-486.096	-268.218	-66.479	120.316	293.274	453.421	601.705	739.005	866.134	983.847	1.092.840	1.193.760	1.287.204	1.373.726	1.453.839	1.528.018	1.596.702	1.660.299	**5,36**
1.500.000	-1.500.000	-1.225.537	-971.404	-736.096	-518.218	-316.479	-129.684	43.274	203.421	351.705	489.005	616.134	733.847	842.840	943.760	1.037.204	1.123.726	1.203.839	1.278.018	1.346.702	1.410.299	**6,75**
1.750.000	-1.750.000	-1.475.537	-1.221.404	-986.096	-768.218	-566.479	-379.684	-206.726	-46.579	101.705	239.005	366.134	483.847	592.840	693.760	787.204	873.726	953.839	1.028.018	1.096.702	1.160.299	**8,31**
2.000.000	-2.000.000	-1.725.537	-1.471.404	-1.236.096	-1.018.218	-816.479	-629.684	-456.726	-296.579	-148.295	-10.995	116.134	233.847	342.840	443.760	537.204	623.726	703.839	778.018	846.702	910.299	**10,09**
2.250.000	-2.250.000	-1.975.537	-1.721.404	-1.486.096	-1.268.218	-1.066.479	-879.684	-706.726	-546.579	-398.295	-260.995	-133.866	-16.153	92.840	193.760	287.204	373.726	453.839	528.018	596.702	660.299	**12,15**
2.500.000	-2.500.000	-2.225.537	-1.971.404	-1.736.096	-1.518.218	-1.316.479	-1.129.684	-956.726	-796.579	-648.295	-510.995	-383.866	-266.153	-157.160	-56.240	37.204	123.726	203.839	278.018	346.702	410.299	**14,60**
2.750.000	-2.750.000	-2.475.537	-2.221.404	-1.986.096	-1.768.218	-1.566.479	-1.379.684	-1.206.726	-1.046.579	-898.295	-760.995	-633.866	-516.153	-407.160	-306.240	-212.796	-126.274	-46.161	28.018	96.702	160.299	**17,62**
3.000.000	-3.000.000	-2.725.537	-2.471.404	-2.236.096	-2.018.218	-1.816.479	-1.629.684	-1.456.726	-1.296.579	-1.148.295	-1.010.995	-883.866	-766.153	-657.160	-556.240	-462.796	-376.274	-296.161	-221.982	-153.298	-89.701	**21,57**
3.250.000	-3.250.000	-2.975.537	-2.721.404	-2.486.096	-2.268.218	-2.066.479	-1.879.684	-1.706.726	-1.546.579	-1.398.295	-1.260.995	-1.133.866	-1.016.153	-907.160	-806.240	-712.796	-626.274	-546.161	-471.982	-403.298	-339.701	**27,25**

Anhang 5-9: Einzelne Kapitalwerte in € für alle betrachtungsrelevanten Kalkulationszinsätze und Investitionssummen des Szenarios K_{rf}-Wert im offenen Geltungsbereich nach Kapitel 5.4.5.3: Nettogegenwartswert, S. 602.

0,1 %

Investitionssumme I_0 in €	Betriebszeit in Jahren																				Break-even des KW in Jahren
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1.000.000	-1.000.000	1.039.113	3.076.190	5.111.231	7.144.240	9.175.217	11.204.166	13.231.087	15.255.984	17.278.857	19.299.710	21.318.544	23.335.362	25.350.164	27.362.954	29.373.733	31.382.503	33.389.266	35.394.025	37.396.780	39.397.536	0,49
2.500.000	-2.500.000	-460.887	1.576.190	3.611.231	5.644.240	7.675.217	9.704.166	11.731.087	13.755.984	15.778.857	17.799.710	19.818.544	21.835.362	23.850.164	25.862.954	27.873.733	29.882.503	31.889.266	33.894.025	35.896.780	37.897.536	1,23
5.000.000	-5.000.000	-2.960.887	-923.810	1.111.231	3.144.240	5.175.217	7.204.166	9.231.087	11.255.984	13.278.857	15.299.710	17.318.544	19.335.362	21.350.164	23.362.954	25.373.733	27.382.503	29.389.266	31.394.025	33.396.780	35.397.536	2,45
7.500.000	-7.500.000	-5.460.887	-3.423.810	-1.388.769	644.240	2.675.217	4.704.166	6.731.087	8.755.984	10.778.857	12.799.710	14.818.544	16.835.362	18.850.164	20.862.954	22.873.733	24.882.503	26.889.266	28.894.025	30.896.780	32.897.536	3,68
10.000.000	-10.000.000	-7.960.887	-5.923.810	-3.888.769	-1.855.760	175.217	2.204.166	4.231.087	6.255.984	8.278.857	10.299.710	12.318.544	14.335.362	16.350.164	18.362.954	20.373.733	22.382.503	24.389.266	26.394.025	28.396.780	30.397.536	4,91
12.500.000	-12.500.000	-10.460.887	-8.423.810	-6.388.769	-4.355.760	-2.324.783	-295.834	1.731.087	3.755.984	5.778.857	7.799.710	9.818.544	11.835.362	13.850.164	15.862.954	17.873.733	19.882.503	21.889.266	23.894.025	25.896.780	27.897.536	6,15
15.000.000	-15.000.000	-12.960.887	-10.923.810	-8.888.769	-6.855.760	-4.824.783	-2.795.834	-768.913	1.255.984	3.278.857	5.299.710	7.318.544	9.335.362	11.350.164	13.362.954	15.373.733	17.382.503	19.389.266	21.394.025	23.396.780	25.397.536	7,38
17.500.000	-17.500.000	-15.460.887	-13.423.810	-11.388.769	-9.355.760	-7.324.783	-5.295.834	-3.268.913	-1.244.016	778.857	2.799.710	4.818.544	6.835.362	8.850.164	10.862.954	12.873.733	14.882.503	16.889.266	18.894.025	20.896.780	22.897.536	8,61
20.000.000	-20.000.000	-17.960.887	-15.923.810	-13.888.769	-11.855.760	-9.824.783	-7.795.834	-5.768.913	-3.744.016	-1.721.143	299.710	2.318.544	4.335.362	6.350.164	8.362.954	10.373.733	12.382.503	14.389.266	16.394.025	18.396.780	20.397.536	9,85
22.500.000	-22.500.000	-20.460.887	-18.423.810	-16.388.769	-14.355.760	-12.324.783	-10.295.834	-8.268.913	-6.244.016	-4.221.143	-2.200.290	-181.456	1.835.362	3.850.164	5.862.954	7.873.733	9.882.503	11.889.266	13.894.025	15.896.780	17.897.536	11,09
25.000.000	-25.000.000	-22.960.887	-20.923.810	-18.888.769	-16.855.760	-14.824.783	-12.795.834	-10.768.913	-8.744.016	-6.721.143	-4.700.290	-2.681.456	-664.638	1.350.164	3.362.954	5.373.733	7.382.503	9.389.266	11.394.025	13.396.780	15.397.536	12,33
27.500.000	-27.500.000	-25.460.887	-23.423.810	-21.388.769	-19.355.760	-17.324.783	-15.295.834	-13.268.913	-11.244.016	-9.221.143	-7.200.290	-5.181.456	-3.164.638	-1.149.836	862.954	2.873.733	4.882.503	6.889.266	8.894.025	10.896.780	12.897.536	13,57
30.000.000	-30.000.000	-27.960.887	-25.923.810	-23.888.769	-21.855.760	-19.824.783	-17.795.834	-15.768.913	-13.744.016	-11.721.143	-9.700.290	-7.681.456	-5.664.638	-3.649.836	-1.637.046	373.733	2.382.503	4.389.266	6.394.025	8.396.780	10.397.536	14,81

0,5 %

Investitionssumme I_0 in €	Betriebszeit in Jahren																				Break-even des KW in Jahren
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1.000.000	-1.000.000	1.030.998	3.051.891	5.062.730	7.063.565	9.054.445	11.035.420	13.006.540	14.967.854	16.919.409	18.861.256	20.793.441	22.716.014	24.629.021	26.532.511	28.426.531	30.311.128	32.186.349	34.052.240	35.908.849	37.756.220	0,49
2.500.000	-2.500.000	-469.002	1.551.891	3.562.730	5.563.565	7.554.445	9.535.420	11.506.540	13.467.854	15.419.409	17.361.256	19.293.441	21.216.014	23.129.021	25.032.511	26.926.531	28.811.128	30.686.349	32.552.240	34.408.849	36.256.220	1,23
5.000.000	-5.000.000	-2.969.002	-948.109	1.062.730	3.063.565	5.054.445	7.035.420	9.006.540	10.967.854	12.919.409	14.861.256	16.793.441	18.716.014	20.629.021	22.532.511	24.426.531	26.311.128	28.186.349	30.052.240	31.908.849	33.756.220	2,47
7.500.000	-7.500.000	-5.469.002	-3.448.109	-1.437.270	563.565	2.554.445	4.535.420	6.506.540	8.467.854	10.419.409	12.361.256	14.293.441	16.216.014	18.129.021	20.032.511	21.926.531	23.811.128	25.686.349	27.552.240	29.408.849	31.256.220	3,72
10.000.000	-10.000.000	-7.969.002	-5.948.109	-3.937.270	-1.936.435	54.445	2.035.420	4.006.540	5.967.854	7.919.409	9.861.256	11.793.441	13.716.014	15.629.021	17.532.511	19.426.531	21.311.128	23.186.349	25.052.240	26.908.849	28.756.220	4,97
12.500.000	-12.500.000	-10.469.002	-8.448.109	-6.437.270	-4.436.435	-2.445.555	-464.580	1.506.540	3.467.854	5.419.409	7.361.256	9.293.441	11.216.014	13.129.021	15.032.511	16.926.531	18.811.128	20.686.349	22.552.240	24.408.849	26.256.220	6,24
15.000.000	-15.000.000	-12.969.002	-10.948.109	-8.937.270	-6.936.435	-4.945.555	-2.964.580	-993.460	967.854	2.919.409	4.861.256	6.793.441	8.716.014	10.629.021	12.532.511	14.426.531	16.311.128	18.186.349	20.052.240	21.908.849	23.756.220	7,51
17.500.000	-17.500.000	-15.469.002	-13.448.109	-11.437.270	-9.436.435	-7.445.555	-5.464.580	-3.493.460	-1.532.146	419.409	2.361.256	4.293.441	6.216.014	8.129.021	10.032.511	11.926.531	13.811.128	15.686.349	17.552.240	19.408.849	21.256.220	8,79
20.000.000	-20.000.000	-17.969.002	-15.948.109	-13.937.270	-11.936.435	-9.945.555	-7.964.580	-5.993.460	-4.032.146	-2.080.591	-138.744	1.793.441	3.716.014	5.629.021	7.532.511	9.426.531	11.311.128	13.186.349	15.052.240	16.908.849	18.756.220	10,07
22.500.000	-22.500.000	-20.469.002	-18.448.109	-16.437.270	-14.436.435	-12.445.555	-10.464.580	-8.493.460	-6.532.146	-4.580.591	-2.638.744	-706.559	1.216.014	3.129.021	5.032.511	6.926.531	8.811.128	10.686.349	12.552.240	14.408.849	16.256.220	11,37
25.000.000	-25.000.000	-22.969.002	-20.948.109	-18.937.270	-16.936.435	-14.945.555	-12.964.580	-10.993.460	-9.032.146	-7.080.591	-5.138.744	-3.206.559	-1.283.986	629.021	2.532.511	4.426.531	6.311.128	8.186.349	10.052.240	11.908.849	13.756.220	12,67
27.500.000	-27.500.000	-25.469.002	-23.448.109	-21.437.270	-19.436.435	-17.445.555	-15.464.580	-13.493.460	-11.532.146	-9.580.591	-7.638.744	-5.706.559	-3.783.986	-1.870.979	32.511	1.926.531	3.811.128	5.686.349	7.552.240	9.408.849	11.256.220	13,98
30.000.000	-30.000.000	-27.969.002	-25.948.109	-23.937.270	-21.936.435	-19.945.555	-17.964.580	-15.993.460	-14.032.146	-12.080.591	-10.138.744	-8.206.559	-6.283.986	-4.370.979	-2.467.489	-573.469	1.311.128	3.186.349	5.052.240	6.908.849	8.756.220	15,30

1 %

Investitionssumme I_0 in €	Betriebszeit in Jahren																				Break-even des KW in Jahren
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1.000.000	-1.000.000	1.020.943	3.021.877	5.003.000	6.964.507	8.906.594	10.829.452	12.733.272	14.618.242	16.484.549	18.332.378	20.161.911	21.973.331	23.766.815	25.542.542	27.300.688	29.041.426	30.764.930	32.471.369	34.160.912	35.833.728	0,49
2.500.000	-2.500.000	-479.057	1.521.877	3.503.000	5.464.507	7.406.594	9.329.452	11.233.272	13.118.242	14.984.549	16.832.378	18.661.911	20.473.331	22.266.815	24.042.542	25.800.688	27.541.426	29.264.930	30.971.369	32.660.912	34.333.728	1,24
5.000.000	-5.000.000	-2.979.057	-978.123	1.003.000	2.964.507	4.906.594	6.829.452	8.733.272	10.618.242	12.484.549	14.332.378	16.161.911	17.973.331	19.766.815	21.542.542	23.300.688	25.041.426	26.764.930	28.471.369	30.160.912	31.833.728	2,49
7.500.000	-7.500.000	-5.479.057	-3.478.123	-1.497.000	464.507	2.406.594	4.329.452	6.233.272	8.118.242	9.984.549	11.832.378	13.661.911	15.473.331	17.266.815	19.042.542	20.800.688	22.541.426	24.264.930	25.971.369	27.660.912	29.333.728	3,76
10.000.000	-10.000.000	-7.979.057	-5.978.123	-3.997.000	-2.035.493	-93.406	1.829.452	3.733.272	5.618.242	7.484.549	9.332.378	11.161.911	12.973.331	14.766.815	16.542.542	18.300.688	20.041.426	21.764.930	23.471.369	25.160.912	26.833.728	5,05
12.500.000	-12.500.000	-10.479.057	-8.478.123	-6.497.000	-4.535.493	-2.593.406	-670.548	1.233.272	3.118.242	4.984.549	6.832.378	8.661.911	10.473.331	12.266.815	14.042.542	15.800.688	17.541.426	19.264.930	20.971.369	22.660.912	24.333.728	6,35
15.000.000	-15.000.000	-12.979.057	-10.978.123	-8.997.000	-7.035.493	-5.093.406	-3.170.548	-1.266.728	618.242	2.484.549	4.332.378	6.161.911	7.973.331	9.766.815	11.542.542	13.300.688	15.041.426	16.764.930	18.471.369	20.160.912	21.833.728	7,67
17.500.000	-17.500.000	-15.479.057	-13.478.123	-11.497.000	-9.535.493	-7.593.406	-5.670.548	-3.766.728	-1.881.758	-15.451	1.832.378	3.661.911	5.473.331	7.266.815	9.042.542	10.800.688	12.541.426	14.264.930	15.971.369	17.660.912	19.333.728	9,01
20.000.000	-20.000.000	-17.979.057	-15.978.123	-13.997.000	-12.035.493	-10.093.406	-8.170.548	-6.266.728	-4.381.758	-2.515.451	-667.622	1.161.911	2.973.331	4.766.815	6.542.542	8.300.688	10.041.426	11.764.930	13.471.369	15.160.912	16.833.728	10,36
22.500.000	-22.500.000	-20.479.057	-18.478.123	-16.497.000	-14.535.493	-12.593.406	-10.670.548	-8.766.728	-6.881.758	-5.015.451	-3.167.622	-1.338.089	473.331	2.266.815	4.042.542	5.800.688	7.541.426	9.264.930	10.971.369	12.660.912	14.333.728	11,74
25.000.000	-25.000.000	-22.979.057	-20.978.123	-18.997.000	-17.035.493	-15.093.406	-13.170.548	-11.266.728	-9.381.758	-7.515.451	-5.667.622	-3.838.089	-2.026.669	-233.185	1.542.542	3.300.688	5.041.426	6.764.930	8.471.369	10.160.912	11.833.728	13,13
27.500.000	-27.500.000	-25.479.057	-23.478.123	-21.497.000	-19.535.493	-17.593.406	-15.670.548	-13.766.728	-11.881.758	-10.015.451	-8.167.622	-6.338.089	-4.526.669	-2.733.185	-957.458	800.688	2.541.426	4.264.930	5.971.369	7.660.912	9.333.728	14,54
30.000.000	-30.000.000	-27.979.057	-25.978.123	-23.997.000	-22.035.493	-20.093.406	-18.170.548	-16.266.728	-14.381.758	-12.515.451	-10.667.622	-8.838.089	-7.026.669	-5.233.185	-3.457.458	-1.699.312	41.426	1.764.930	3.471.369	5.160.912	6.833.728	15,98

2 %

Investitionssumme I_0 in €	Betriebszeit in Jahren																				Break-even des KW in Jahren
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1.000.000	-1.000.000	1.001.130	2.963.022	4.886.446	6.772.155	8.620.890	10.433.375	12.210.321	13.952.426	15.660.371	17.334.827	18.976.450	20.585.885	22.163.763	23.710.701	25.227.308	26.714.177	28.171.892	29.601.024	31.002.134	32.375.771	0,50
2.500.000	-2.500.000	-498.870	1.463.022	3.386.446	5.272.155	7.120.890	8.933.375	10.710.321	12.452.426	14.160.371	15.834.827	17.476.450	19.085.885	20.663.763	22.210.701	23.727.308	25.214.177	26.671.892	28.101.024	29.502.134	30.875.771	1,25
5.000.000	-5.000.000	-2.998.870	-1.036.978	886.446	2.772.155	4.620.890	6.433.375	8.210.321	9.952.426	11.660.371	13.334.827	14.976.450	16.585.885	18.163.763	19.710.701	21.227.308	22.714.177	24.171.892	25.601.024	27.002.134	28.375.771	2,54
7.500.000	-7.500.000	-5.498.870	-3.536.978	-1.613.554	272.155	2.120.890	3.933.375	5.710.321	7.452.426	9.160.371	10.834.827	12.476.450	14.085.885	15.663.763	17.210.701	18.727.308	20.214.177	21.671.892	23.101.024	24.502.134	25.875.771	3,86
10.000.000	-10.000.000	-7.998.870	-6.036.978	-4.113.554	-2.227.845	-379.110	1.433.375	3.210.321	4.952.426	6.660.371	8.334.827	9.976.450	11.585.885	13.163.763	14.710.701	16.227.308	17.714.177	19.171.892	20.601.024	22.002.134	23.375.771	5,21
12.500.000	-12.500.000	-10.498.870	-8.536.978	-6.613.554	-4.727.845	-2.879.110	-1.066.625	710.321	2.452.426	4.160.371	5.834.827	7.476.450	9.085.885	10.663.763	12.210.701	13.727.308	15.214.177	16.671.892	18.101.024	19.502.134	20.875.771	6,60
15.000.000	-15.000.000	-12.998.870	-11.036.978	-9.113.554	-7.227.845	-5.379.110	-3.566.625	-1.789.679	-47.574	1.660.371	3.334.827	4.976.450	6.585.885	8.163.763	9.710.701	11.227.308	12.714.177	14.171.892	15.601.024	17.002.134	18.375.771	8,03
17.500.000	-17.500.000	-15.498.870	-13.536.978	-11.613.554	-9.727.845	-7.879.110	-6.066.625	-4.289.679	-2.547.574	-839.629	834.827	2.476.450	4.085.885	5.663.763	7.210.701	8.727.308	10.214.177	11.671.892	13.101.024	14.502.134	15.875.771	9,50
20.000.000	-20.000.000	-17.998.870	-16.036.978	-14.113.554	-12.227.845	-10.379.110	-8.566.625	-6.789.679	-5.047.574	-3.339.629	-1.665.173	-23.550	1.585.885	3.163.763	4.710.701	6.227.308	7.714.177	9.171.892	10.601.024	12.002.134	13.375.771	11,01
22.500.000	-22.500.000	-20.498.870	-18.536.978	-16.613.554	-14.727.845	-12.879.110	-11.066.625	-9.289.679	-7.547.574	-5.839.629	-4.165.173	-2.523.550	-914.115	663.763	2.210.701	3.727.308	5.214.177	6.671.892	8.101.024	9.502.134	10.875.771	12,58
25.000.000	-25.000.000	-22.998.870	-21.036.978	-19.113.554	-17.227.845	-15.379.110	-13.566.625	-11.789.679	-10.047.574	-8.339.629	-6.665.173	-5.023.550	-3.414.115	-1.836.237	-289.299	1.227.308	2.714.177	4.171.892	5.601.024	7.002.134	8.375.771	14,19
27.500.000	-27.500.000	-25.498.870	-23.536.978	-21.613.554	-19.727.845	-17.879.110	-16.066.625	-14.289.679	-12.547.574	-10.839.629	-9.165.173	-7.523.550	-5.914.115	-4.336.237	-2.789.299	-1.272.692	214.177	1.671.892	3.101.024	4.502.134	5.875.771	15,86
30.000.000	-30.000.000	-27.998.870	-26.036.978	-24.113.554	-22.227.845	-20.379.110	-18.566.625	-16.789.679	-15.047.574	-13.339.629	-11.665.173	-10.023.550	-8.414.115	-6.836.237	-5.289.299	-3.772.692	-2.285.823	-828.108	601.024	2.002.134	3.375.771	17,58

Fortsetzung **Anhang 5-9.**

3 %

Investitionssumme I_0 in €	Betriebszeit in Jahren																				Break-even des KW in Jahren
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1.000.000	-1.000.000	981.702	2.905.684	4.773.627	6.587.165	8.347.881	10.057.314	11.716.958	13.328.263	14.892.637	16.411.446	17.886.018	19.317.641	20.707.567	22.057.009	23.367.147	24.639.126	25.874.057	27.073.019	28.237.060	29.367.197	0,50
2.500.000	-2.500.000	-518.298	1.405.684	3.273.627	5.087.165	6.847.881	8.557.314	10.216.958	11.828.263	13.392.637	14.911.446	16.386.018	17.817.641	19.207.567	20.557.009	21.867.147	23.139.126	24.374.057	25.573.019	26.737.060	27.867.197	1,27
5.000.000	-5.000.000	-3.018.298	-1.094.316	773.627	2.587.165	4.347.881	6.057.314	7.716.958	9.328.263	10.892.637	12.411.446	13.886.018	15.317.641	16.707.567	18.057.009	19.367.147	20.639.126	21.874.057	23.073.019	24.237.060	25.367.197	2,59
7.500.000	-7.500.000	-5.518.298	-3.594.316	-1.726.373	87.165	1.847.881	3.557.314	5.216.958	6.828.263	8.392.637	9.911.446	11.386.018	12.817.641	14.207.567	15.557.009	16.867.147	18.139.126	19.374.057	20.573.019	21.737.060	22.867.197	3,95
10.000.000	-10.000.000	-8.018.298	-6.094.316	-4.226.373	-2.412.835	-652.119	1.057.314	2.716.958	4.328.263	5.892.637	7.411.446	8.886.018	10.317.641	11.707.567	13.057.009	14.367.147	15.639.126	16.874.057	18.073.019	19.237.060	20.367.197	5,38
12.500.000	-12.500.000	-10.518.298	-8.594.316	-6.726.373	-4.912.835	-3.152.119	-1.442.686	216.958	1.828.263	3.392.637	4.911.446	6.386.018	7.817.641	9.207.567	10.557.009	11.867.147	13.139.126	14.374.057	15.573.019	16.737.060	17.867.197	6,87
15.000.000	-15.000.000	-13.018.298	-11.094.316	-9.226.373	-7.412.835	-5.652.119	-3.942.686	-2.283.042	-671.737	892.637	2.411.446	3.886.018	5.317.641	6.707.567	8.057.009	9.367.147	10.639.126	11.874.057	13.073.019	14.237.060	15.367.197	8,43
17.500.000	-17.500.000	-15.518.298	-13.594.316	-11.726.373	-9.912.835	-8.152.119	-6.442.686	-4.783.042	-3.171.737	-1.607.363	-88.554	1.386.018	2.817.641	4.207.567	5.557.009	6.867.147	8.139.126	9.374.057	10.573.019	11.737.060	12.867.197	10,06
20.000.000	-20.000.000	-18.018.298	-16.094.316	-14.226.373	-12.412.835	-10.652.119	-8.942.686	-7.283.042	-5.671.737	-4.107.363	-2.588.554	-1.113.982	317.641	1.707.567	3.057.009	4.367.147	5.639.126	6.874.057	8.073.019	9.237.060	10.367.197	11,78
22.500.000	-22.500.000	-20.518.298	-18.594.316	-16.726.373	-14.912.835	-13.152.119	-11.442.686	-9.783.042	-8.171.737	-6.607.363	-5.088.554	-3.613.982	-2.182.359	-792.433	557.009	1.867.147	3.139.126	4.374.057	5.573.019	6.737.060	7.867.197	13,59
25.000.000	-25.000.000	-23.018.298	-21.094.316	-19.226.373	-17.412.835	-15.652.119	-13.942.686	-12.283.042	-10.671.737	-9.107.363	-7.588.554	-6.113.982	-4.682.359	-3.292.433	-1.942.991	-632.853	639.126	1.874.057	3.073.019	4.237.060	5.367.197	15,50
27.500.000	-27.500.000	-25.518.298	-23.594.316	-21.726.373	-19.912.835	-18.152.119	-16.442.686	-14.783.042	-13.171.737	-11.607.363	-10.088.554	-8.613.982	-7.182.359	-5.792.433	-4.442.991	-3.132.853	-1.860.874	-625.943	573.019	1.737.060	2.867.197	17,52
30.000.000	-30.000.000	-28.018.298	-26.094.316	-24.226.373	-22.412.835	-20.652.119	-18.942.686	-17.283.042	-15.671.737	-14.107.363	-12.588.554	-11.113.982	-9.682.359	-8.292.433	-6.942.991	-5.632.853	-4.360.874	-3.125.943	-1.926.981	-762.940	367.197	19,68

5 %

Investitionssumme I_0 in €																					Break-even des KW in Jahren
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1.000.000	-1.000.000	943.955	2.795.340	4.558.565	6.237.826	7.837.123	9.360.262	10.810.871	12.192.404	13.508.149	14.761.239	15.954.659	17.091.249	18.173.716	19.204.637	20.186.466	21.121.542	22.012.090	22.860.231	23.667.984	24.437.273	0,51
2.500.000	-2.500.000	-556.045	1.295.340	3.058.565	4.737.826	6.337.123	7.860.262	9.310.871	10.692.404	12.008.149	13.261.239	14.454.659	15.591.249	16.673.716	17.704.637	18.686.466	19.621.542	20.512.090	21.360.231	22.167.984	22.937.273	1,30
5.000.000	-5.000.000	-3.056.045	-1.204.660	558.565	2.237.826	3.837.123	5.360.262	6.810.871	8.192.404	9.508.149	10.761.239	11.954.659	13.091.249	14.173.716	15.204.637	16.186.466	17.121.542	18.012.090	18.860.231	19.667.984	20.437.273	2,68
7.500.000	-7.500.000	-5.556.045	-3.704.660	-1.941.435	-262.174	1.337.123	2.860.262	4.310.871	5.692.404	7.008.149	8.261.239	9.454.659	10.591.249	11.673.716	12.704.637	13.686.466	14.621.542	15.512.090	16.360.231	17.167.984	17.937.273	4,16
10.000.000	-10.000.000	-8.056.045	-6.204.660	-4.441.435	-2.762.174	-1.162.877	360.262	1.810.871	3.192.404	4.508.149	5.761.239	6.954.659	8.091.249	9.173.716	10.204.637	11.186.466	12.121.542	13.012.090	13.860.231	14.667.984	15.437.273	5,76
12.500.000	-12.500.000	-10.556.045	-8.704.660	-6.941.435	-5.262.174	-3.662.877	-2.139.738	-689.129	692.404	2.008.149	3.261.239	4.454.659	5.591.249	6.673.716	7.704.637	8.686.466	9.621.542	10.512.090	11.360.231	12.167.984	12.937.273	7,50
15.000.000	-15.000.000	-13.056.045	-11.204.660	-9.441.435	-7.762.174	-6.162.877	-4.639.738	-3.189.129	-1.807.596	-491.851	761.239	1.954.659	3.091.249	4.173.716	5.204.637	6.186.466	7.121.542	8.012.090	8.860.231	9.667.984	10.437.273	9,39
17.500.000	-17.500.000	-15.556.045	-13.704.660	-11.941.435	-10.262.174	-8.662.877	-7.139.738	-5.689.129	-4.307.596	-2.991.851	-1.738.761	-545.341	591.249	1.673.716	2.704.637	3.686.466	4.621.542	5.512.090	6.360.231	7.167.984	7.937.273	11,48
20.000.000	-20.000.000	-18.056.045	-16.204.660	-14.441.435	-12.762.174	-11.162.877	-9.639.738	-8.189.129	-6.807.596	-5.491.851	-4.238.761	-3.045.341	-1.908.751	-826.284	204.637	1.186.466	2.121.542	3.012.090	3.860.231	4.667.984	5.437.273	13,80
22.500.000	-22.500.000	-20.556.045	-18.704.660	-16.941.435	-15.262.174	-13.662.877	-12.139.738	-10.689.129	-9.307.596	-7.991.851	-6.738.761	-5.545.341	-4.408.751	-3.326.284	-2.295.363	-1.313.534	-378.458	512.090	1.360.231	2.167.984	2.937.273	16,42
25.000.000	-25.000.000	-23.056.045	-21.204.660	-19.441.435	-17.762.174	-16.162.877	-14.639.738	-13.189.129	-11.807.596	-10.491.851	-9.238.761	-8.045.341	-6.908.751	-5.826.284	-4.795.363	-3.813.534	-2.878.458	-1.987.910	-1.139.769	-332.016	437.273	19,43
27.500.000	-27.500.000	-25.556.045	-23.704.660	-21.941.435	-20.262.174	-18.662.877	-17.139.738	-15.689.129	-14.307.596	-12.991.851	-11.738.761	-10.545.341	-9.408.751	-8.326.284	-7.295.363	-6.313.534	-5.378.458	-4.487.910	-3.639.769	-2.832.016	-2.062.727	22,95
30.000.000	-30.000.000	-28.056.045	-26.204.660	-24.441.435	-22.762.174	-21.162.877	-19.639.738	-18.189.129	-16.807.596	-15.491.851	-14.238.761	-13.045.341	-11.908.751	-10.826.284	-9.795.363	-8.813.534	-7.878.458	-6.987.910	-6.139.769	-5.332.016	-4.562.727	27,21

8 %

Investitionssumme I_0 in €																					Break-even des KW in Jahren
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1.000.000	-1.000.000	889.956	2.639.915	4.260.248	5.760.556	7.149.731	8.436.003	9.626.996	10.729.767	11.750.852	12.696.300	13.571.716	14.382.285	15.132.813	15.827.746	16.471.202	17.066.995	17.618.655	18.129.452	18.602.412	19.040.337	0,53
2.500.000	-2.500.000	-610.044	1.139.915	2.760.248	4.260.556	5.649.731	6.936.003	8.126.996	9.229.767	10.250.852	11.196.300	12.071.716	12.882.285	13.632.813	14.327.746	14.971.202	15.566.995	16.118.655	16.629.452	17.102.412	17.540.337	1,35
5.000.000	-5.000.000	-3.110.044	-1.360.085	260.248	1.760.556	3.149.731	4.436.003	5.626.996	6.729.767	7.750.852	8.696.300	9.571.716	10.382.285	11.132.813	11.827.746	12.471.202	13.066.995	13.618.655	14.129.452	14.602.412	15.040.337	2,84
7.500.000	-7.500.000	-5.610.044	-3.860.085	-2.239.752	-739.444	649.731	1.936.003	3.126.996	4.229.767	5.250.852	6.196.300	7.071.716	7.882.285	8.632.813	9.327.746	9.971.202	10.566.995	11.118.655	11.629.452	12.102.412	12.540.337	4,53
10.000.000	-10.000.000	-8.110.044	-6.360.085	-4.739.752	-3.239.444	-1.850.269	-563.997	626.996	1.729.767	2.750.852	3.696.300	4.571.716	5.382.285	6.132.813	6.827.746	7.471.202	8.066.995	8.618.655	9.129.452	9.602.412	10.040.337	6,47
12.500.000	-12.500.000	-10.610.044	-8.860.085	-7.239.752	-5.739.444	-4.350.269	-3.063.997	-1.873.004	-770.233	250.852	1.196.300	2.071.716	2.882.285	3.632.813	4.327.746	4.971.202	5.566.995	6.118.655	6.629.452	7.102.412	7.540.337	8,75
15.000.000	-15.000.000	-13.110.044	-11.360.085	-9.739.752	-8.239.444	-6.850.269	-5.563.997	-4.373.004	-3.270.233	-2.249.148	-1.303.700	-428.284	382.285	1.132.813	1.827.746	2.471.202	3.066.995	3.618.655	4.129.452	4.602.412	5.040.337	11,53
17.500.000	-17.500.000	-15.610.044	-13.860.085	-12.239.752	-10.739.444	-9.350.269	-8.063.997	-6.873.004	-5.770.233	-4.749.148	-3.803.700	-2.928.284	-2.117.715	-1.367.187	-672.254	-28.798	566.995	1.118.655	1.629.452	2.102.412	2.540.337	15,05
20.000.000	-20.000.000	-18.110.044	-16.360.085	-14.739.752	-13.239.444	-11.850.269	-10.563.997	-9.373.004	-8.270.233	-7.249.148	-6.303.700	-5.428.284	-4.617.715	-3.867.187	-3.172.254	-2.528.798	-1.933.005	-1.381.345	-870.548	-397.588	40.337	19,91
22.500.000	-22.500.000	-20.610.044	-18.860.085	-17.239.752	-15.739.444	-14.350.269	-13.063.997	-11.873.004	-10.770.233	-9.749.148	-8.803.700	-7.928.284	-7.117.715	-6.367.187	-5.672.254	-5.028.798	-4.433.005	-3.881.345	-3.370.548	-2.897.588	-2.459.663	27,76
25.000.000	-25.000.000	-23.110.044	-21.360.085	-19.739.752	-18.239.444	-16.850.269	-15.563.997	-14.373.004	-13.270.233	-12.249.148	-11.303.700	-10.428.284	-9.617.715	-8.867.187	-8.172.254	-7.528.798	-6.933.005	-6.381.345	-5.870.548	-5.397.588	-4.959.663	50,73

Anhang 5-10: Einzelne Kapitalwerte in € für alle betrachtungsrelevanten Kalkulationszinsätze und Investitionssummen des Szenarios $K_{rf,m}$-Wert im geschlossenen Geltungsbereich nach Kapitel 5.4.5.3: Nettogegenwartswert, S.602.

0,1 %

Investitionssumme I_0 in € \ Betriebszeit in Jahren	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Break-even des KW in Jahren
5.000.000	-5.000.000	915.120	6.824.331	12.727.639	18.625.049	24.516.568	30.402.201	36.281.954	42.155.834	48.023.845	53.885.994	59.742.287	65.592.730	71.437.328	77.276.087	83.109.013	88.936.113	94.757.390	100.572.853	106.382.506	112.186.355	0,85
10.000.000	-10.000.000	-4.084.880	1.824.331	7.727.639	13.625.049	19.516.568	25.402.201	31.281.954	37.155.834	43.023.845	48.885.994	54.742.287	60.592.730	66.437.328	72.276.087	78.109.013	83.936.113	89.757.390	95.572.853	101.382.506	107.186.355	1,69
15.000.000	-15.000.000	-9.084.880	-3.175.669	2.727.639	8.625.049	14.516.568	20.402.201	26.281.954	32.155.834	38.023.845	43.885.994	49.742.287	55.592.730	61.437.328	67.276.087	73.109.013	78.936.113	84.757.390	90.572.853	96.382.506	102.186.355	2,54
20.000.000	-20.000.000	-14.084.880	-8.175.669	-2.272.361	3.625.049	9.516.568	15.402.201	21.281.954	27.155.834	33.023.845	38.885.994	44.742.287	50.592.730	56.437.328	62.276.087	68.109.013	73.936.113	79.757.390	85.572.853	91.382.506	97.186.355	3,39
25.000.000	-25.000.000	-19.084.880	-13.175.669	-7.272.361	-1.374.951	4.516.568	10.402.201	16.281.954	22.155.834	28.023.845	33.885.994	39.742.287	45.592.730	51.437.328	57.276.087	63.109.013	68.936.113	74.757.390	80.572.853	86.382.506	92.186.355	4,23
30.000.000	-30.000.000	-24.084.880	-18.175.669	-12.272.361	-6.374.951	-483.432	5.402.201	11.281.954	17.155.834	23.023.845	28.885.994	34.742.287	40.592.730	46.437.328	52.276.087	58.109.013	63.936.113	69.757.390	75.572.853	81.382.506	87.186.355	5,08
35.000.000	-35.000.000	-29.084.880	-23.175.669	-17.272.361	-11.374.951	-5.483.432	402.201	6.281.954	12.155.834	18.023.845	23.885.994	29.742.287	35.592.730	41.437.328	47.276.087	53.109.013	58.936.113	64.757.390	70.572.853	76.382.506	82.186.355	5,93
40.000.000	-40.000.000	-34.084.880	-28.175.669	-22.272.361	-16.374.951	-10.483.432	-4.597.799	1.281.954	7.155.834	13.023.845	18.885.994	24.742.287	30.592.730	36.437.328	42.276.087	48.109.013	53.936.113	59.757.390	65.572.853	71.382.506	77.186.355	6,78
45.000.000	-45.000.000	-39.084.880	-33.175.669	-27.272.361	-21.374.951	-15.483.432	-9.597.799	-3.718.046	2.155.834	8.023.845	13.885.994	19.742.287	25.592.730	31.437.328	37.276.087	43.109.013	48.936.113	54.757.390	60.572.853	66.382.506	72.186.355	7,63
50.000.000	-50.000.000	-44.084.880	-38.175.669	-32.272.361	-26.374.951	-20.483.432	-14.597.799	-8.718.046	-2.844.166	3.023.845	8.885.994	14.742.287	20.592.730	26.437.328	32.276.087	38.109.013	43.936.113	49.757.390	55.572.853	61.382.506	67.186.355	8,48
55.000.000	-55.000.000	-49.084.880	-43.175.669	-37.272.361	-31.374.951	-25.483.432	-19.597.799	-13.718.046	-7.844.166	-1.976.155	3.885.994	9.742.287	15.592.730	21.437.328	27.276.087	33.109.013	38.936.113	44.757.390	50.572.853	56.382.506	62.186.355	9,34
60.000.000	-60.000.000	-54.084.880	-48.175.669	-42.272.361	-36.374.951	-30.483.432	-24.597.799	-18.718.046	-12.844.166	-6.976.155	-1.114.006	4.742.287	10.592.730	16.437.328	22.276.087	28.109.013	33.936.113	39.757.390	45.572.853	51.382.506	57.186.355	10,19
65.000.000	-65.000.000	-59.084.880	-53.175.669	-47.272.361	-41.374.951	-35.483.432	-29.597.799	-23.718.046	-17.844.166	-11.976.155	-6.114.006	-257.713	5.592.730	11.437.328	17.276.087	23.109.013	28.936.113	34.757.390	40.572.853	46.382.506	52.186.355	11,04

0,5 %

Investitionssumme I_0 in € \ Betriebszeit in Jahren	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Break-even des KW in Jahren
5.000.000	-5.000.000	891.577	6.753.843	12.586.944	18.391.024	24.166.228	29.912.700	35.630.583	41.320.018	46.981.147	52.614.112	58.219.052	63.796.107	69.345.415	74.867.115	80.361.343	85.828.237	91.267.933	96.680.565	102.066.269	107.425.179	0,85
10.000.000	-10.000.000	-4.108.423	1.753.843	7.586.944	13.391.024	19.166.228	24.912.700	30.630.583	36.320.018	41.981.147	47.614.112	53.219.052	58.796.107	64.345.415	69.867.115	75.361.343	80.828.237	86.267.933	91.680.565	97.066.269	102.425.179	1,70
15.000.000	-15.000.000	-9.108.423	-3.246.157	2.586.944	8.391.024	14.166.228	19.912.700	25.630.583	31.320.018	36.981.147	42.614.112	48.219.052	53.796.107	59.345.415	64.867.115	70.361.343	75.828.237	81.267.933	86.680.565	92.066.269	97.425.179	2,56
20.000.000	-20.000.000	-14.108.423	-8.246.157	-2.413.056	3.391.024	9.166.228	14.912.700	20.630.583	26.320.018	31.981.147	37.614.112	43.219.052	48.796.107	54.345.415	59.867.115	65.361.343	70.828.237	76.267.933	81.680.565	87.066.269	92.425.179	3,42
25.000.000	-25.000.000	-19.108.423	-13.246.157	-7.413.056	-1.608.976	4.166.228	9.912.700	15.630.583	21.320.018	26.981.147	32.614.112	38.219.052	43.796.107	49.345.415	54.867.115	60.361.343	65.828.237	71.267.933	76.680.565	82.066.269	87.425.179	4,28
30.000.000	-30.000.000	-24.108.423	-18.246.157	-12.413.056	-6.608.976	-833.772	4.912.700	10.630.583	16.320.018	21.981.147	27.614.112	33.219.052	38.796.107	44.345.415	49.867.115	55.361.343	60.828.237	66.267.933	71.680.565	77.066.269	82.425.179	5,15
35.000.000	-35.000.000	-29.108.423	-23.246.157	-17.413.056	-11.608.976	-5.833.772	-87.300	5.630.583	11.320.018	16.981.147	22.614.112	28.219.052	33.796.107	39.345.415	44.867.115	50.361.343	55.828.237	61.267.933	66.680.565	72.066.269	77.425.179	6,02
40.000.000	-40.000.000	-34.108.423	-28.246.157	-22.413.056	-16.608.976	-10.833.772	-5.087.300	630.583	6.320.018	11.981.147	17.614.112	23.219.052	28.796.107	34.345.415	39.867.115	45.361.343	50.828.237	56.267.933	61.680.565	67.066.269	72.425.179	6,89
45.000.000	-45.000.000	-39.108.423	-33.246.157	-27.413.056	-21.608.976	-15.833.772	-10.087.300	-4.369.417	1.320.018	6.981.147	12.614.112	18.219.052	23.796.107	29.345.415	34.867.115	40.361.343	45.828.237	51.267.933	56.680.565	62.066.269	67.425.179	7,77
50.000.000	-50.000.000	-44.108.423	-38.246.157	-32.413.056	-26.608.976	-20.833.772	-15.087.300	-9.369.417	-3.679.982	1.981.147	7.614.112	13.219.052	18.796.107	24.345.415	29.867.115	35.361.343	40.828.237	46.267.933	51.680.565	57.066.269	62.425.179	8,65
55.000.000	-55.000.000	-49.108.423	-43.246.157	-37.413.056	-31.608.976	-25.833.772	-20.087.300	-14.369.417	-8.679.982	-3.018.853	2.614.112	8.219.052	13.796.107	19.345.415	24.867.115	30.361.343	35.828.237	41.267.933	46.680.565	52.066.269	57.425.179	9,54
60.000.000	-60.000.000	-54.108.423	-48.246.157	-42.413.056	-36.608.976	-30.833.772	-25.087.300	-19.369.417	-13.679.982	-8.018.853	-2.385.888	3.219.052	8.796.107	14.345.415	19.867.115	25.361.343	30.828.237	36.267.933	41.680.565	47.066.269	52.425.179	10,43
65.000.000	-65.000.000	-59.108.423	-53.246.157	-47.413.056	-41.608.976	-35.833.772	-30.087.300	-24.369.417	-18.679.982	-13.018.853	-7.385.888	-1.780.948	3.796.107	9.345.415	14.867.115	20.361.343	25.828.237	31.267.933	36.680.565	42.066.269	47.425.179	11,32

1 %

Investitionssumme I_0 in € \ Betriebszeit in Jahren	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Break-even des KW in Jahren
5.000.000	-5.000.000	862.411	6.666.779	12.413.677	18.103.676	23.737.338	29.315.221	34.837.877	40.305.854	45.719.692	51.079.928	56.387.093	61.641.711	66.844.303	71.995.385	77.095.465	82.145.050	87.144.639	92.094.727	96.995.804	101.848.356	0,85
10.000.000	-10.000.000	-4.137.589	1.666.779	7.413.677	13.103.676	18.737.338	24.315.221	29.837.877	35.305.854	40.719.692	46.079.928	51.387.093	56.641.711	61.844.303	66.995.385	72.095.465	77.145.050	82.144.639	87.094.727	91.995.804	96.848.356	1,71
15.000.000	-15.000.000	-9.137.589	-3.333.221	2.413.677	8.103.676	13.737.338	19.315.221	24.837.877	30.305.854	35.719.692	41.079.928	46.387.093	51.641.711	56.844.303	61.995.385	67.095.465	72.145.050	77.144.639	82.094.727	86.995.804	91.848.356	2,58
20.000.000	-20.000.000	-14.137.589	-8.333.221	-2.586.323	3.103.676	8.737.338	14.315.221	19.837.877	25.305.854	30.719.692	36.079.928	41.387.093	46.641.711	51.844.303	56.995.385	62.095.465	67.145.050	72.144.639	77.094.727	81.995.804	86.848.356	3,45
25.000.000	-25.000.000	-19.137.589	-13.333.221	-7.586.323	-1.896.324	3.737.338	9.315.221	14.837.877	20.305.854	25.719.692	31.079.928	36.387.093	41.641.711	46.844.303	51.995.385	57.095.465	62.145.050	67.144.639	72.094.727	76.995.804	81.848.356	4,34
30.000.000	-30.000.000	-24.137.589	-18.333.221	-12.586.323	-6.896.324	-1.262.662	4.315.221	9.837.877	15.305.854	20.719.692	26.079.928	31.387.093	36.641.711	41.844.303	46.995.385	52.095.465	57.145.050	62.144.639	67.094.727	71.995.804	76.848.356	5,23
35.000.000	-35.000.000	-29.137.589	-23.333.221	-17.586.323	-11.896.324	-6.262.662	-684.779	4.837.877	10.305.854	15.719.692	21.079.928	26.387.093	31.641.711	36.844.303	41.995.385	47.095.465	52.145.050	57.144.639	62.094.727	66.995.804	71.848.356	6,12
40.000.000	-40.000.000	-34.137.589	-28.333.221	-22.586.323	-16.896.324	-11.262.662	-5.684.779	-162.123	5.305.854	10.719.692	16.079.928	21.387.093	26.641.711	31.844.303	36.995.385	42.095.465	47.145.050	52.144.639	57.094.727	61.995.804	66.848.356	7,03
45.000.000	-45.000.000	-39.137.589	-33.333.221	-27.586.323	-21.896.324	-16.262.662	-10.684.779	-5.162.123	305.854	5.719.692	11.079.928	16.387.093	21.641.711	26.844.303	31.995.385	37.095.465	42.145.050	47.144.639	52.094.727	56.995.804	61.848.356	7,94
50.000.000	-50.000.000	-44.137.589	-38.333.221	-32.586.323	-26.896.324	-21.262.662	-15.684.779	-10.162.123	-4.694.146	719.692	6.079.928	11.387.093	16.641.711	21.844.303	26.995.385	32.095.465	37.145.050	42.144.639	47.094.727	51.995.804	56.848.356	8,87
55.000.000	-55.000.000	-49.137.589	-43.333.221	-37.586.323	-31.896.324	-26.262.662	-20.684.779	-15.162.123	-9.694.146	-4.280.308	1.079.928	6.387.093	11.641.711	16.844.303	21.995.385	27.095.465	32.145.050	37.144.639	42.094.727	46.995.804	51.848.356	9,80
60.000.000	-60.000.000	-54.137.589	-48.333.221	-42.586.323	-36.896.324	-31.262.662	-25.684.779	-20.162.123	-14.694.146	-9.280.308	-3.920.072	1.387.093	6.641.711	11.844.303	16.995.385	22.095.465	27.145.050	32.144.639	37.094.727	41.995.804	46.848.356	10,74
65.000.000	-65.000.000	-59.137.589	-53.333.221	-47.586.323	-41.896.324	-36.262.662	-30.684.779	-25.162.123	-19.694.146	-14.280.308	-8.920.072	-3.612.907	1.641.711	6.844.303	11.995.385	17.095.465	22.145.050	27.144.639	32.094.727	36.995.804	41.848.356	11,69

2 %

Investitionssumme I_0 in € \ Betriebszeit in Jahren	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Break-even des KW in Jahren
5.000.000	-5.000.000	804.937	6.496.051	12.075.575	17.545.696	22.908.560	28.166.270	33.320.888	38.374.434	43.328.892	48.186.203	52.948.273	57.616.969	62.194.121	66.681.526	71.080.943	75.394.096	79.622.678	83.768.346	87.832.727	91.817.414	0,86
10.000.000	-10.000.000	-4.195.063	1.496.051	7.075.575	12.545.696	17.908.560	23.166.270	28.320.888	33.374.434	38.328.892	43.186.203	47.948.273	52.616.969	57.194.121	61.681.526	66.080.943	70.394.096	74.622.678	78.768.346	82.832.727	86.817.414	1,74
15.000.000	-15.000.000	-9.195.063	-3.503.949	2.075.575	7.545.696	12.908.560	18.166.270	23.320.888	28.374.434	33.328.892	38.186.203	42.948.273	47.616.969	52.194.121	56.681.526	61.080.943	65.394.096	69.622.678	73.768.346	77.832.727	81.817.414	2,63
20.000.000	-20.000.000	-14.195.063	-8.503.949	-2.924.425	2.545.696	7.908.560	13.166.270	18.320.888	23.374.434	28.328.892	33.186.203	37.948.273	42.616.969	47.194.121	51.681.526	56.080.943	60.394.096	64.622.678	68.768.346	72.832.727	76.817.414	3,53
25.000.000	-25.000.000	-19.195.063	-13.503.949	-7.924.425	-2.454.304	2.908.560	8.166.270	13.320.888	18.374.434	23.328.892	28.186.203	32.948.273	37.616.969	42.194.121	46.681.526	51.080.943	55.394.096	59.622.678	63.768.346	67.832.727	71.817.414	4,46
30.000.000	-30.000.000	-24.195.063	-18.503.949	-12.924.425	-7.454.304	-2.091.440	3.166.270	8.320.888	13.374.434	18.328.892	23.186.203	27.948.273	32.616.969	37.194.121	41.681.526	46.080.943	50.394.096	54.622.678	58.768.346	62.832.727	66.817.414	5,40
35.000.000	-35.000.000	-29.195.063	-23.503.949	-17.924.425	-12.454.304	-7.091.440	-1.833.730	3.320.888	8.374.434	13.328.892	18.186.203	22.948.273	27.616.969	32.194.121	36.681.526	41.080.943	45.394.096	49.622.678	53.768.346	57.832.727	61.817.414	6,36
40.000.000	-40.000.000	-34.195.063	-28.503.949	-22.924.425	-17.454.304	-12.091.440	-6.833.730	-1.679.112	3.374.434	8.328.892	13.186.203	17.948.273	22.616.969	27.194.121	31.681.526	36.080.943	40.394.096	44.622.678	48.768.346	52.832.727	56.817.414	7,33
45.000.000	-45.000.000	-39.195.063	-33.503.949	-27.924.425	-22.454.304	-17.091.440	-11.833.730	-6.679.112	-1.625.566	3.328.892	8.186.203	12.948.273	17.616.969	22.194.121	26.681.526	31.080.943	35.394.096	39.622.678	43.768.346	47.832.727	51.817.414	8,33
50.000.000	-50.000.000	-44.195.063	-38.503.949	-32.924.425	-27.454.304	-22.091.440	-16.833.730	-11.679.112	-6.625.566	-1.671.108	3.186.203	7.948.273	12.616.969	17.194.121	21.681.526	26.080.943	30.394.096	34.622.678	38.768.346	42.832.727	46.817.414	9,34
55.000.000	-55.000.000	-49.195.063	-43.503.949	-37.924.425	-32.454.304	-27.091.440	-21.833.730	-16.679.112	-11.625.566	-6.671.108	-1.813.797	2.948.273	7.616.969	12.194.121	16.681.526	21.080.943	25.394.096	29.622.678	33.768.346	37.832.727	41.817.414	10,38
60.000.000	-60.000.000	-54.195.063	-48.503.949	-42.924.425	-37.454.304	-32.091.440	-26.833.730	-21.679.112	-16.625.566	-11.671.108	-6.813.797	-2.051.727	2.616.969	7.194.121	11.681.526	16.080.943	20.394.096	24.622.678	28.768.346	32.832.727	36.817.414	11,44
65.000.000	-65.000.000	-59.195.063	-53.503.949	-47.924.425	-42.454.304	-37.091.440	-31.833.730	-26.679.112	-21.625.566	-16.671.108	-11.813.797	-7.051.727	-2.383.031	2.194.121	6.681.526	11.080.943	15.394.096	19.622.678	23.768.346	27.832.727	31.817.414	12,52

Betriebszeit in Jahren

3 %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Investitionssumme I_0 in €																						**Break-even des KW in Jahren**
5.000.000	-5.000.000	748.578	6.329.722	11.748.308	17.009.071	22.116.608	27.075.382	31.889.725	36.563.845	41.101.826	45.507.632	49.785.114	53.938.009	57.969.946	61.884.448	65.684.935	69.374.728	72.957.052	76.435.036	79.811.720	83.090.054	**0,87**
10.000.000	-10.000.000	-4.251.422	1.329.722	6.748.308	12.009.071	17.116.608	22.075.382	26.889.725	31.563.845	36.101.826	40.507.632	44.785.114	48.938.009	52.969.946	56.884.448	60.684.935	64.374.728	67.957.052	71.435.036	74.811.720	78.090.054	**1,76**
15.000.000	-15.000.000	-9.251.422	-3.670.278	1.748.308	7.009.071	12.116.608	17.075.382	21.889.725	26.563.845	31.101.826	35.507.632	39.785.114	43.938.009	47.969.946	51.884.448	55.684.935	59.374.728	62.957.052	66.435.036	69.811.720	73.090.054	**2,68**
20.000.000	-20.000.000	-14.251.422	-8.670.278	-3.251.692	2.009.071	7.116.608	12.075.382	16.889.725	21.563.845	26.101.826	30.507.632	34.785.114	38.938.009	42.969.946	46.884.448	50.684.935	54.374.728	57.957.052	61.435.036	64.811.720	68.090.054	**3,62**
25.000.000	-25.000.000	-19.251.422	-13.670.278	-8.251.692	-2.990.929	2.116.608	7.075.382	11.889.725	16.563.845	21.101.826	25.507.632	29.785.114	33.938.009	37.969.946	41.884.448	45.684.935	49.374.728	52.957.052	56.435.036	59.811.720	63.090.054	**4,59**
30.000.000	-30.000.000	-24.251.422	-18.670.278	-13.251.692	-7.990.929	-2.883.392	2.075.382	6.889.725	11.563.845	16.101.826	20.507.632	24.785.114	28.938.009	32.969.946	36.884.448	40.684.935	44.374.728	47.957.052	51.435.036	54.811.720	58.090.054	**5,58**
35.000.000	-35.000.000	-29.251.422	-23.670.278	-18.251.692	-12.990.929	-7.883.392	-2.924.618	1.889.725	6.563.845	11.101.826	15.507.632	19.785.114	23.938.009	27.969.946	31.884.448	35.684.935	39.374.728	42.957.052	46.435.036	49.811.720	53.090.054	**6,61**
40.000.000	-40.000.000	-34.251.422	-28.670.278	-23.251.692	-17.990.929	-12.883.392	-7.924.618	-3.110.275	1.563.845	6.101.826	10.507.632	14.785.114	18.938.009	22.969.946	26.884.448	30.684.935	34.374.728	37.957.052	41.435.036	44.811.720	48.090.054	**7,67**
45.000.000	-45.000.000	-39.251.422	-33.670.278	-28.251.692	-22.990.929	-17.883.392	-12.924.618	-8.110.275	-3.436.155	1.101.826	5.507.632	9.785.114	13.938.009	17.969.946	21.884.448	25.684.935	29.374.728	32.957.052	36.435.036	39.811.720	43.090.054	**8,76**
50.000.000	-50.000.000	-44.251.422	-38.670.278	-33.251.692	-27.990.929	-22.883.392	-17.924.618	-13.110.275	-8.436.155	-3.898.174	507.632	4.785.114	8.938.009	12.969.946	16.884.448	20.684.935	24.374.728	27.957.052	31.435.036	34.811.720	38.090.054	**9,88**
55.000.000	-55.000.000	-49.251.422	-43.670.278	-38.251.692	-32.990.929	-27.883.392	-22.924.618	-18.110.275	-13.436.155	-8.898.174	-4.492.368	-214.886	3.938.009	7.969.946	11.884.448	15.684.935	19.374.728	22.957.052	26.435.036	29.811.720	33.090.054	**11,05**
60.000.000	-60.000.000	-54.251.422	-48.670.278	-43.251.692	-37.990.929	-32.883.392	-27.924.618	-23.110.275	-18.436.155	-13.898.174	-9.492.368	-5.214.886	-1.061.991	2.969.946	6.884.448	10.684.935	14.374.728	17.957.052	21.435.036	24.811.720	28.090.054	**12,26**
65.000.000	-65.000.000	-59.251.422	-53.670.278	-48.251.692	-42.990.929	-37.883.392	-32.924.618	-28.110.275	-23.436.155	-18.898.174	-14.492.368	-10.214.886	-6.061.991	-2.030.054	1.884.448	5.684.935	9.374.728	12.957.052	16.435.036	19.811.720	23.090.054	**13,52**

5 %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Investitionssumme I_0 in €																						**Break-even des KW in Jahren**
5.000.000	-5.000.000	639.081	6.009.635	11.124.448	15.995.698	20.634.984	25.053.352	29.261.321	33.268.911	37.085.663	40.720.665	44.182.572	47.479.626	50.619.677	53.610.202	56.458.322	59.170.816	61.754.144	64.214.457	66.557.611	68.789.187	**0,89**
10.000.000	-10.000.000	-4.360.919	1.009.635	6.124.448	10.995.698	15.634.984	20.053.352	24.261.321	28.268.911	32.085.663	35.720.665	39.182.572	42.479.626	45.619.677	48.610.202	51.458.322	54.170.816	56.754.144	59.214.457	61.557.611	63.789.187	**1,81**
15.000.000	-15.000.000	-9.360.919	-3.990.365	1.124.448	5.995.698	10.634.984	15.053.352	19.261.321	23.268.911	27.085.663	30.720.665	34.182.572	37.479.626	40.619.677	43.610.202	46.458.322	49.170.816	51.754.144	54.214.457	56.557.611	58.789.187	**2,78**
20.000.000	-20.000.000	-14.360.919	-8.990.365	-3.875.552	995.698	5.634.984	10.053.352	14.261.321	18.268.911	22.085.663	25.720.665	29.182.572	32.479.626	35.619.677	38.610.202	41.458.322	44.170.816	46.754.144	49.214.457	51.557.611	53.789.187	**3,80**
25.000.000	-25.000.000	-19.360.919	-13.990.365	-8.875.552	-4.004.302	634.984	5.053.352	9.261.321	13.268.911	17.085.663	20.720.665	24.182.572	27.479.626	30.619.677	33.610.202	36.458.322	39.170.816	41.754.144	44.214.457	46.557.611	48.789.187	**4,86**
30.000.000	-30.000.000	-24.360.919	-18.990.365	-13.875.552	-9.004.302	-4.365.016	53.352	4.261.321	8.268.911	12.085.663	15.720.665	19.182.572	22.479.626	25.619.677	28.610.202	31.458.322	34.170.816	36.754.144	39.214.457	41.557.611	43.789.187	**5,99**
35.000.000	-35.000.000	-29.360.919	-23.990.365	-18.875.552	-14.004.302	-9.365.016	-4.946.648	-738.679	3.268.911	7.085.663	10.720.665	14.182.572	17.479.626	20.619.677	23.610.202	26.458.322	29.170.816	31.754.144	34.214.457	36.557.611	38.789.187	**7,18**
40.000.000	-40.000.000	-34.360.919	-28.990.365	-23.875.552	-19.004.302	-14.365.016	-9.946.648	-5.738.679	-1.731.089	2.085.663	5.720.665	9.182.572	12.479.626	15.619.677	18.610.202	21.458.322	24.170.816	26.754.144	29.214.457	31.557.611	33.789.187	**8,45**
45.000.000	-45.000.000	-39.360.919	-33.990.365	-28.875.552	-24.004.302	-19.365.016	-14.946.648	-10.738.679	-6.731.089	-2.914.337	720.665	4.182.572	7.479.626	10.619.677	13.610.202	16.458.322	19.170.816	21.754.144	24.214.457	26.557.611	28.789.187	**9,80**
50.000.000	-50.000.000	-44.360.919	-38.990.365	-33.875.552	-29.004.302	-24.365.016	-19.946.648	-15.738.679	-11.731.089	-7.914.337	-4.279.335	-817.428	2.479.626	5.619.677	8.610.202	11.458.322	14.170.816	16.754.144	19.214.457	21.557.611	23.789.187	**11,25**
55.000.000	-55.000.000	-49.360.919	-43.990.365	-38.875.552	-34.004.302	-29.365.016	-24.946.648	-20.738.679	-16.731.089	-12.914.337	-9.279.335	-5.817.428	-2.520.374	619.677	3.610.202	6.458.322	9.170.816	11.754.144	14.214.457	16.557.611	18.789.187	**12,80**
60.000.000	-60.000.000	-54.360.919	-48.990.365	-43.875.552	-39.004.302	-34.365.016	-29.946.648	-25.738.679	-21.731.089	-17.914.337	-14.279.335	-10.817.428	-7.520.374	-4.380.323	-1.389.798	1.458.322	4.170.816	6.754.144	9.214.457	11.557.611	13.789.187	**14,49**
65.000.000	-65.000.000	-59.360.919	-53.990.365	-48.875.552	-44.004.302	-39.365.016	-34.946.648	-30.738.679	-26.731.089	-22.914.337	-19.279.335	-15.817.428	-12.520.374	-9.380.323	-6.389.798	-3.541.678	-829.184	1.754.144	4.214.457	6.557.611	8.789.187	**16,32**

8 %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Investitionssumme I_0 in €																						**Break-even des KW in Jahren**
5.000.000	-5.000.000	482.440	5.558.773	10.259.082	14.611.220	18.640.977	22.372.234	25.827.101	29.026.052	31.988.044	34.730.629	37.270.059	39.621.384	41.798.536	43.814.418	45.680.975	47.409.269	49.009.541	50.491.274	51.863.250	53.133.597	**0,91**
10.000.000	-10.000.000	-4.517.560	558.773	5.259.082	9.611.220	13.640.977	17.372.234	20.827.101	24.026.052	26.988.044	29.730.629	32.270.059	34.621.384	36.798.536	38.814.418	40.680.975	42.409.269	44.009.541	45.491.274	46.863.250	48.133.597	**1,89**
15.000.000	-15.000.000	-9.517.560	-4.441.227	259.082	4.611.220	8.640.977	12.372.234	15.827.101	19.026.052	21.988.044	24.730.629	27.270.059	29.621.384	31.798.536	33.814.418	35.680.975	37.409.269	39.009.541	40.491.274	41.863.250	43.133.597	**2,94**
20.000.000	-20.000.000	-14.517.560	-9.441.227	-4.740.918	-388.780	3.640.977	7.372.234	10.827.101	14.026.052	16.988.044	19.730.629	22.270.059	24.621.384	26.798.536	28.814.418	30.680.975	32.409.269	34.009.541	35.491.274	36.863.250	38.133.597	**4,10**
25.000.000	-25.000.000	-19.517.560	-14.441.227	-9.740.918	-5.388.780	-1.359.023	2.372.234	5.827.101	9.026.052	11.988.044	14.730.629	17.270.059	19.621.384	21.798.536	23.814.418	25.680.975	27.409.269	29.009.541	30.491.274	31.863.250	33.133.597	**5,36**
30.000.000	-30.000.000	-24.517.560	-19.441.227	-14.740.918	-10.388.780	-6.359.023	-2.627.766	827.101	4.026.052	6.988.044	9.730.629	12.270.059	14.621.384	16.798.536	18.814.418	20.680.975	22.409.269	24.009.541	25.491.274	26.863.250	28.133.597	**6,76**
35.000.000	-35.000.000	-29.517.560	-24.441.227	-19.740.918	-15.388.780	-11.359.023	-7.627.766	-4.172.899	-973.948	1.988.044	4.730.629	7.270.059	9.621.384	11.798.536	13.814.418	15.680.975	17.409.269	19.009.541	20.491.274	21.863.250	23.133.597	**8,33**
40.000.000	-40.000.000	-34.517.560	-29.441.227	-24.740.918	-20.388.780	-16.359.023	-12.627.766	-9.172.899	-5.973.948	-3.011.956	-269.371	2.270.059	4.621.384	6.798.536	8.814.418	10.680.975	12.409.269	14.009.541	15.491.274	16.863.250	18.133.597	**10,11**
45.000.000	-45.000.000	-39.517.560	-34.441.227	-29.740.918	-25.388.780	-21.359.023	-17.627.766	-14.172.899	-10.973.948	-8.011.956	-5.269.371	-2.729.941	-378.616	1.798.536	3.814.418	5.680.975	7.409.269	9.009.541	10.491.274	11.863.250	13.133.597	**12,17**
50.000.000	-50.000.000	-44.517.560	-39.441.227	-34.740.918	-30.388.780	-26.359.023	-22.627.766	-19.172.899	-15.973.948	-13.011.956	-10.269.371	-7.729.941	-5.378.616	-3.201.464	-1.185.582	680.975	2.409.269	4.009.541	5.491.274	6.863.250	8.133.597	**14,64**
55.000.000	-55.000.000	-49.517.560	-44.441.227	-39.740.918	-35.388.780	-31.359.023	-27.627.766	-24.172.899	-20.973.948	-18.011.956	-15.269.371	-12.729.941	-10.378.616	-8.201.464	-6.185.582	-4.319.025	-2.590.731	-990.459	491.274	1.863.250	3.133.597	**17,67**
60.000.000	-60.000.000	-54.517.560	-49.441.227	-44.740.918	-40.388.780	-36.359.023	-32.627.766	-29.172.899	-25.973.948	-23.011.956	-20.269.371	-17.729.941	-15.378.616	-13.201.464	-11.185.582	-9.319.025	-7.590.731	-5.990.459	-4.508.726	-3.136.750	-1.866.403	**21,63**
65.000.000	-65.000.000	-59.517.560	-54.441.227	-49.740.918	-45.388.780	-41.359.023	-37.627.766	-34.172.899	-30.973.948	-28.011.956	-25.269.371	-22.729.941	-20.378.616	-18.201.464	-16.185.582	-14.319.025	-12.590.731	-10.990.459	-9.508.726	-8.136.750	-6.866.403	**27,37**

Anhang 6-1: Kumulierte Sekundärrohstoffpotenziale für den Zeitraum zwischen 2020 und 2050 für die Region Sachsen samt deutschseitiger Anrainer inklusive Berlin für die Fälle eines Recyclings zur Verwendung und eines Recyclings zur Verwertung

Materialanfall

Jahr	Altmodule gesamt		Recycling zur Verwendung					Recycling zur Verwertung					
	MW_p	Stück	Glas	Silizium-rohwafer	Silizium-bruch	Kupfer	Aluminium-legierung	Glas	Silizium-bruch	Kupfer	Aluminium	Silber	Σ Blei und Bismut
2020	37,20	155.003	150.291	7.869.811	15,81	21,76	403,94	2.123,09	92,96	21,76	408,62	0,91	0,08
2021	37,51	156.289	151.538	7.935.098	15,94	21,94	407,29	2.140,70	93,74	21,94	412,01	0,92	0,08
2022	37,94	158.097	153.291	8.026.904	16,13	22,20	412,00	2.165,47	94,82	22,20	416,78	0,93	0,08
2023	38,58	160.732	155.846	8.160.699	16,40	22,57	418,87	2.201,56	96,40	22,57	423,72	0,95	0,08
2024	36,42	151.756	147.143	7.704.953	15,48	21,31	395,48	2.078,61	91,02	21,31	400,06	0,89	0,08
2025	34,17	142.368	138.040	7.228.310	14,52	19,99	371,01	1.950,02	85,39	19,99	375,31	0,84	0,07
2026	36,65	152.702	148.059	7.752.965	15,58	21,44	397,94	2.091,56	91,58	21,44	402,55	0,90	0,08
2027	41,33	172.211	166.975	8.743.472	17,57	24,18	448,78	2.358,78	103,28	24,18	453,98	1,01	0,09
2028	46,75	194.784	188.862	9.889.564	19,87	27,35	507,61	2.667,97	116,82	27,35	513,49	1,15	0,10
2029	57,26	238.584	231.331	12.113.370	24,34	33,50	621,75	3.267,90	143,09	33,50	628,95	1,40	0,12
2030	75,41	314.216	304.663	15.953.355	32,06	44,11	818,85	4.303,83	188,45	44,11	828,34	1,85	0,16
2031	103,88	432.807	419.650	21.974.491	44,16	60,76	1.127,90	5.928,19	259,58	60,76	1.140,97	2,54	0,22
2032	144,35	601.426	583.143	30.535.599	61,36	84,44	1.567,32	8.237,77	360,71	84,44	1.585,48	3,54	0,31
2033	193,70	807.066	782.531	40.976.360	82,34	113,31	2.103,21	11.054,44	484,05	113,31	2.127,59	4,75	0,42
2034	248,19	1.034.090	1.002.653	52.502.800	105,50	145,18	2.694,84	14.164,00	620,21	145,18	2.726,07	6,08	0,54
2035	306,97	1.279.011	1.240.129	64.937.959	130,49	179,56	3.333,10	17.518,70	767,10	179,56	3.371,73	7,52	0,66
2036	368,83	1.536.737	1.490.020	78.023.217	156,78	215,75	4.004,74	21.048,79	921,67	215,75	4.051,15	9,04	0,80
2037	432,18	1.800.697	1.745.956	91.424.977	183,71	252,81	4.692,62	24.664,27	1.079,99	252,81	4.747,00	10,59	0,94
2038	495,36	2.063.937	2.001.193	104.790.199	210,56	289,76	5.378,62	28.269,88	1.237,87	289,76	5.440,95	12,14	1,07
2039	556,28	2.317.745	2.247.285	117.676.529	236,46	325,39	6.040,04	31.746,31	1.390,09	325,39	6.110,04	13,63	1,20
2040	612,90	2.553.651	2.476.020	129.653.983	260,52	358,51	6.654,82	34.977,54	1.531,58	358,51	6.731,94	15,02	1,33
2041	663,28	2.763.566	2.679.553	140.311.766	281,94	387,99	7.201,85	37.852,75	1.657,48	387,99	7.285,31	16,25	1,44
2042	705,71	2.940.345	2.850.958	149.287.177	299,98	412,80	7.662,54	40.274,10	1.763,50	412,80	7.751,34	17,29	1,53
2043	738,81	3.078.276	2.984.696	156.290.212	314,05	432,17	8.021,99	42.163,35	1.846,23	432,17	8.114,95	18,10	1,60
2044	761,70	3.173.629	3.077.150	161.131.473	323,77	445,55	8.270,48	43.469,41	1.903,42	445,55	8.366,32	18,66	1,65
2045	774,01	3.224.913	3.126.876	163.735.305	329,01	452,75	8.404,12	44.171,86	1.934,17	452,75	8.501,52	18,96	1,68
2046	775,95	3.233.004	3.134.721	164.146.082	329,83	453,89	8.425,21	44.282,68	1.939,03	453,89	8.522,85	19,01	1,68
2047	768,29	3.201.097	3.103.784	162.526.117	326,58	449,41	8.342,06	43.845,65	1.919,89	449,41	8.438,73	18,82	1,66
2048	752,31	3.134.516	3.039.227	159.145.650	319,78	440,06	8.168,55	42.933,68	1.879,96	440,06	8.263,21	18,43	1,63
2049	729,71	3.040.365	2.947.937	154.365.389	310,18	426,85	7.923,19	41.644,08	1.823,49	426,85	8.015,01	17,88	1,58
2050	702,51	2.927.042	2.838.060	148.611.767	298,62	410,94	7.627,87	40.091,89	1.755,52	410,94	7.716,27	17,21	1,52
Σ	**11.314,15**	**47.140.659**	**45.707.583**	**2.393.425.555**	**4.809**	**6.618**	**122.849**	**645.689**	**28.273**	**6.618**	**124.272**	**277**	**24**
			Angaben in Stück					***Angaben in Tonnen***					

Anhang 6-2: Kumulierte Sekundärrohstoffpotenziale für den Zeitraum zwischen 2020 und 2050 für die definierte Region des ostdeutschen PV-Produktionsclusters für die Fälle eines Recyclings zur Verwendung und eines Recyclings zur Verwertung

Materialanfall

Jahr	Altmodule gesamt		Recycling zur Verwendung					Recycling zur Verwertung					
	MW_p	Stück	Glas	Silizium-rohwafer	Silizium-bruch	Kupfer	Aluminium-legierung	Glas	Silizium-bruch	Kupfer	Aluminium	Silber	Σ Blei und Bismut
2020	17,68	73.645	71.407	3.739.128	7,51	10,34	191,92	1.008,73	44,17	10,34	194,14	0,43	0,04
2021	17,73	73.891	71.644	3.751.570	7,54	10,37	192,56	1.012,08	44,32	10,37	194,79	0,43	0,04
2022	17,83	74.276	72.018	3.771.164	7,58	10,43	193,56	1.017,37	44,55	10,43	195,81	0,44	0,04
2023	17,97	74.856	72.580	3.800.571	7,64	10,51	195,07	1.025,30	44,90	10,51	197,33	0,44	0,04
2024	17,67	73.616	71.378	3.737.623	7,51	10,34	191,84	1.008,32	44,15	10,34	194,07	0,43	0,04
2025	17,37	72.373	70.172	3.674.497	7,38	10,16	188,60	991,29	43,41	10,16	190,79	0,43	0,04
2026	17,86	74.394	72.133	3.777.151	7,59	10,44	193,87	1.018,98	44,62	10,44	196,12	0,44	0,04
2027	18,72	78.003	75.632	3.960.389	7,96	10,95	203,28	1.068,42	46,78	10,95	205,63	0,46	0,04
2028	19,58	81.566	79.086	4.141.271	8,32	11,45	212,56	1.117,22	48,92	11,45	215,02	0,48	0,04
2029	21,34	88.893	86.191	4.513.278	9,07	12,48	231,66	1.217,57	53,31	12,48	234,34	0,52	0,05
2030	24,30	101.263	98.185	5.141.339	10,33	14,22	263,89	1.387,01	60,73	14,22	266,95	0,60	0,05
2031	29,65	123.526	119.771	6.271.649	12,60	17,34	321,91	1.691,94	74,09	17,34	325,64	0,73	0,06
2032	38,67	161.110	156.213	8.179.900	16,44	22,62	419,85	2.206,74	96,63	22,62	424,72	0,95	0,08
2033	50,41	210.037	203.652	10.664.021	21,43	29,49	547,36	2.876,90	125,97	29,49	553,70	1,24	0,11
2034	63,58	264.900	256.847	13.449.518	27,03	37,19	690,33	3.628,36	158,88	37,19	698,33	1,56	0,14
2035	78,03	325.121	315.238	16.507.059	33,17	45,64	847,27	4.453,21	194,99	45,64	857,08	1,91	0,17
2036	93,48	389.505	377.664	19.775.923	39,74	54,68	1.015,05	5.335,07	233,61	54,68	1.026,81	2,29	0,20
2037	109,58	456.578	442.698	23.181.364	46,58	64,10	1.189,84	6.253,78	273,84	64,10	1.203,63	2,68	0,24
2038	125,95	524.794	508.840	26.644.844	53,54	73,68	1.367,61	7.188,14	314,75	73,68	1.383,46	3,09	0,27
2039	142,06	591.913	573.919	30.052.607	60,39	83,10	1.542,53	8.107,47	355,01	83,10	1.560,40	3,48	0,31
2040	157,38	655.718	635.784	33.292.104	66,90	92,06	1.708,80	8.981,41	393,27	92,06	1.728,60	3,86	0,34
2041	171,37	714.004	692.298	36.251.396	72,84	100,24	1.860,69	9.779,76	428,23	100,24	1.882,26	4,20	0,37
2042	183,54	764.711	741.464	38.825.902	78,02	107,36	1.992,84	10.474,30	458,64	107,36	2.015,93	4,50	0,40
2043	193,46	806.052	781.548	40.924.860	82,23	113,16	2.100,57	11.040,55	483,44	113,16	2.124,91	4,74	0,42
2044	200,81	836.684	811.249	42.480.134	85,36	117,46	2.180,40	11.460,12	501,81	117,46	2.205,67	4,92	0,43
2045	205,40	855.795	829.779	43.450.413	87,31	120,15	2.230,20	11.721,88	513,27	120,15	2.256,05	5,03	0,44
2046	207,16	863.154	836.914	43.824.073	88,06	121,18	2.249,38	11.822,68	517,69	121,18	2.275,45	5,08	0,45
2047	206,20	859.132	833.014	43.619.846	87,65	120,62	2.238,90	11.767,59	515,27	120,62	2.264,84	5,05	0,45
2048	202,73	844.666	818.988	42.885.397	86,17	118,59	2.201,20	11.569,45	506,60	118,59	2.226,71	4,97	0,44
2049	197,10	821.201	796.236	41.694.017	83,78	115,29	2.140,05	11.248,05	492,52	115,29	2.164,85	4,83	0,43
2050	189,75	790.584	766.551	40.139.552	80,66	110,99	2.060,26	10.828,69	474,16	110,99	2.084,14	4,65	0,41
Σ	**3.054**	**12.725.962**	**12.339.093**	**646.122.557**	**1.298**	**1.787**	**33.164**	**174.308**	**7.633**	**1.787**	**33.548**	**75**	**7**

Angaben in Stück ***Angaben in Tonnen***

Anhang 6-3: Kumulierte Sekundärrohstoffpotenziale für den Zeitraum zwischen 2020 und 2050 für den Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen für die Fälle eines Recyclings zur Verwendung und eines Recyclings zur Verwertung

Materialanfall

Jahr	Altmodule gesamt		Recycling zur Verwendung					Recycling zur Verwertung					
	MW_p	Stück	Glas	Silizium-rohwafer	Silizium-bruch	Kupfer	Aluminium-legierung	Glas	Silizium-bruch	Kupfer	Aluminium	Silber	Σ Blei und Bismut
2020	0,54	2.256	2.188	114.553	0,23	0,32	5,88	30,90	1,35	0,32	5,95	0,01	0,00
2021	0,55	2.291	2.221	116.314	0,23	0,32	5,97	31,38	1,37	0,32	6,04	0,01	0,00
2022	0,56	2.323	2.252	117.920	0,24	0,33	6,05	31,81	1,39	0,33	6,12	0,01	0,00
2023	0,56	2.354	2.282	119.519	0,24	0,33	6,13	32,24	1,41	0,33	6,21	0,01	0,00
2024	0,54	2.259	2.190	114.689	0,23	0,32	5,89	30,94	1,35	0,32	5,95	0,01	0,00
2025	0,51	2.139	2.074	108.580	0,22	0,30	5,57	29,29	1,28	0,30	5,64	0,01	0,00
2026	0,52	2.175	2.109	110.420	0,22	0,31	5,67	29,79	1,30	0,31	5,73	0,01	0,00
2027	0,54	2.259	2.190	114.703	0,23	0,32	5,89	30,94	1,35	0,32	5,96	0,01	0,00
2028	0,56	2.341	2.270	118.854	0,24	0,33	6,10	32,06	1,40	0,33	6,17	0,01	0,00
2029	0,63	2.607	2.528	132.388	0,27	0,37	6,80	35,72	1,56	0,37	6,87	0,02	0,00
2030	0,78	3.264	3.164	165.705	0,33	0,46	8,51	44,70	1,96	0,46	8,60	0,02	0,00
2031	1,21	5.050	4.897	256.413	0,52	0,71	13,16	69,17	3,03	0,71	13,31	0,03	0,00
2032	2,07	8.631	8.369	438.219	0,88	1,21	22,49	118,22	5,18	1,21	22,75	0,05	0,00
2033	3,24	13.492	13.082	685.030	1,38	1,89	35,16	184,80	8,09	1,89	35,57	0,08	0,01
2034	4,57	19.044	18.465	966.914	1,94	2,67	49,63	260,85	11,42	2,67	50,20	0,11	0,01
2035	6,06	25.247	24.479	1.281.822	2,58	3,54	65,79	345,80	15,14	3,54	66,56	0,15	0,01
2036	7,68	31.987	31.015	1.624.061	3,26	4,49	83,36	438,13	19,18	4,49	84,33	0,19	0,02
2037	9,39	39.133	37.943	1.986.842	3,99	5,49	101,98	536,00	23,47	5,49	103,16	0,23	0,02
2038	11,17	46.527	45.113	2.362.266	4,75	6,53	121,25	637,28	27,90	6,53	122,65	0,27	0,02
2039	12,94	53.933	52.293	2.738.283	5,50	7,57	140,55	738,72	32,35	7,57	142,18	0,32	0,03
2040	14,67	61.110	59.252	3.102.665	6,23	8,58	159,25	837,02	36,65	8,58	161,10	0,36	0,03
2041	16,28	67.811	65.749	3.442.887	6,92	9,52	176,71	928,81	40,67	9,52	178,76	0,40	0,04
2042	17,71	73.797	71.554	3.746.825	7,53	10,36	192,32	1.010,80	44,26	10,36	194,54	0,43	0,04
2043	18,93	78.853	76.456	4.003.542	8,04	11,07	205,49	1.080,06	47,29	11,07	207,87	0,46	0,04
2044	19,87	82.808	80.290	4.204.303	8,45	11,63	215,80	1.134,22	49,66	11,63	218,30	0,49	0,04
2045	20,53	85.541	82.941	4.343.093	8,73	12,01	222,92	1.171,66	51,30	12,01	225,50	0,50	0,04
2046	20,88	86.997	84.352	4.417.007	8,88	12,21	226,71	1.191,60	52,18	12,21	229,34	0,51	0,05
2047	20,92	87.182	84.531	4.426.387	8,89	12,24	227,20	1.194,13	52,29	12,24	229,83	0,51	0,05
2048	20,68	86.164	83.545	4.374.734	8,79	12,10	224,54	1.180,20	51,68	12,10	227,15	0,51	0,04
2049	20,18	84.070	81.515	4.268.419	8,58	11,80	219,09	1.151,52	50,42	11,80	221,63	0,49	0,04
2050	19,46	81.061	78.597	4.115.635	8,27	11,38	211,25	1.110,30	48,62	11,38	213,69	0,48	0,04
Σ	**275**	**1.144.706**	**1.109.907**	**58.118.992**	**117**	**161**	**2.983**	**15.679**	**687**	**161**	**3.018**	**6,73**	**0,59**
			Angaben in Stück					***Angaben in Tonnen***					