

Inhalt

1	Einführung	17
1.1	Einleitung.....	17
1.1.1	Wozu Photovoltaik?.....	17
1.1.2	Für wen ist dieses Buch gedacht?.....	18
1.1.3	Aufbau des Buches	18
1.2	Was ist Energie?	19
1.2.1	Definition der Energie	19
1.2.2	Einheiten der Energie	20
1.2.3	Primär-, Sekundär- und Endenergie	21
1.2.4	Energieinhalte verschiedener Stoffe	22
1.3	Probleme der heutigen Energieversorgung	23
1.3.1	Wachsender Energiebedarf.....	23
1.3.2	Verknappung der Ressourcen	24
1.3.3	Klimawandel	25
1.3.4	Gefährdung und Entsorgung.....	27
1.4	Erneuerbare Energien.....	27
1.4.1	Die Familie der erneuerbaren Energien	27
1.4.2	Vor- und Nachteile von erneuerbaren Energien.....	28
1.5	Photovoltaik – das Wichtigste in Kürze	29
1.5.1	Was bedeutet „Photovoltaik“?.....	29
1.5.2	Was sind Solarzellen und Solarmodule?	29
1.5.3	Wie ist eine typische Photovoltaikanlage aufgebaut?.....	31
1.5.4	Was „bringt“ eine Photovoltaikanlage?	31
1.6	Geschichte der Photovoltaik	32
1.6.1	Wie alles begann	32
1.6.2	Die ersten echten Solarzellen	33
1.6.3	From Space to Earth.....	35
1.6.4	Vom Spielzeug zur Energiequelle.....	36

2	Strahlungsangebot der Sonne	37
2.1	Eigenschaften der Solarstrahlung	37
2.1.1	Solarkonstante	37
2.1.2	Spektrum der Sonne.....	38
2.1.3	Air Mass	39
2.2	Globalstrahlung.....	40
2.2.1	Entstehung der Globalstrahlung.....	40
2.2.2	Beiträge von Diffus- und Direktstrahlung	41
2.2.3	Globalstrahlungskarten	43
2.3	Berechnung des Sonnenstandes	45
2.3.1	Sonnendeklination	45
2.3.2	Berechnung der Bahn der Sonne	46
2.4	Strahlung auf geneigte Flächen	48
2.4.1	Strahlungsberechnung mit dem Dreikomponentenmodell	48
2.4.1.1	Direktstrahlung	49
2.4.1.2	Diffusstrahlung	50
2.4.1.3	Reflektierte Strahlung	51
2.4.2	Strahlungsabschätzung mit Diagrammen und Tabellen	52
2.4.3	Ertragsgewinn durch Nachführung	54
2.5	Strahlungsangebot und Weltenergieverbrauch	55
2.5.1	Der Solarstrahlungs-Energiewürfel	55
2.5.2	Das Sahara-Wunder	56
3	Grundlagen der Halbleiterphysik	58
3.1	Aufbau von Halbleitern	58
3.1.1	Bohrsches Atommodell	58
3.1.2	Periodensystem der Elemente	60
3.1.3	Aufbau des Siliziumkristalls	61
3.1.4	Verbindungshalbleiter	61
3.2	Bändermodell des Halbleiters	62
3.2.1	Entstehung von Energiebändern	62
3.2.2	Unterscheidung in Isolatoren, Halbleiter und Leiter	63
3.2.3	Eigenleitungsdichte	64
3.3	Ladungstransport in Halbleitern	65
3.3.1	Feldströme.....	65
3.3.2	Diffusionsströme	67

3.4	Dotierung von Halbleitern	68
3.4.1	n-Dotierung	68
3.4.2	p-Dotierung	69
3.5	Der pn-Übergang	69
3.5.1	Prinzipielle Wirkungsweise	70
3.5.2	Banddiagramm des pn-Übergangs	71
3.5.3	Verhalten bei angelegter Spannung	73
3.5.4	Dioden-Kennlinie	74
3.6	Wechselwirkung von Licht mit Halbleitern	75
3.6.1	Phänomen der Lichtabsorption	75
3.6.1.1	Absorptionskoeffizient	76
3.6.1.2	Direkte und indirekte Halbleiter	76
3.6.2	Lichtreflexion an Oberflächen	79
3.6.2.1	Reflexionsfaktor	79
3.6.2.2	Antireflexbeschichtung	80
4	Aufbau und Wirkungsweise der Solarzelle	82
4.1	Betrachtung der Photodiode	82
4.1.1	Aufbau und Kennlinie	82
4.1.2	Ersatzschaltbild	84
4.2	Funktionsweise der Solarzelle	84
4.2.1	Prinzipieller Aufbau	84
4.2.2	Rekombination und Diffusionslänge	84
4.2.3	Was passiert in den einzelnen Zellbereichen?	86
4.2.4	Back-Surface-Field	88
4.3	Photostrom	89
4.3.1	Absorptionswirkungsgrad	89
4.3.2	Quantenwirkungsgrad	90
4.3.3	Spektrale Empfindlichkeit	90
4.4	Kennlinie und Kenngrößen	92
4.4.1	Kurzschlussstrom I_K	93
4.4.2	Leerlaufspannung U_L	93
4.4.3	Maximum Power Point (MPP)	94
4.4.4	Füllfaktor FF	94
4.4.5	Wirkungsgrad η	95
4.4.6	Temperaturabhängigkeit der Solarzelle	95

4.5	Elektrische Beschreibung realer Solarzellen	97
4.5.1	Vereinfachtes Modell	97
4.5.2	Standard-Modell (Ein-Dioden-Modell).....	97
4.5.3	Zwei-Dioden-Modell	99
4.5.4	Bestimmung der Parameter des Ersatzschaltbildes.....	99
4.6	Betrachtungen zum Wirkungsgrad.....	102
4.6.1	Spektraler Wirkungsgrad	102
4.6.2	Theoretischer Wirkungsgrad	105
4.6.3	Verluste in der realen Solarzelle	107
4.6.3.1	Optische Verluste.....	107
4.6.3.2	Elektrische Verluste	109
4.7	Hocheffizienzzellen	110
4.7.1	Buried-Contact-Zelle.....	110
4.7.2	Punktkontakt-Zelle	111
4.7.3	PERL-Zelle	112
5	Zellentechnologien	113
5.1	Herstellung kristalliner Silizium-Zellen	113
5.1.1	Vom Sand zum Silizium.....	113
5.1.1.1	Herstellung von Polysilizium	113
5.1.1.2	Herstellung von monokristallinem Silizium.....	115
5.1.1.3	Herstellung von multikristallinem Silizium	116
5.1.2	Vom Silizium zum Wafer.....	117
5.1.2.1	Waferherstellung	117
5.1.2.2	Wafer aus Foliensilizium	117
5.1.3	Herstellung von Standard-Solarzellen	118
5.1.4	Herstellung von Solarmodulen	120
5.2	Zellen aus amorphem Silizium	121
5.2.1	Eigenschaften von amorphem Silizium	122
5.2.2	Herstellungsverfahren	122
5.2.3	Aufbau der pin-Zelle	123
5.2.4	Staebler-Wronski-Effekt	124
5.2.5	Stapelzellen.....	126
5.2.6	Kombizellen aus mikromorphem Material	127
5.2.7	Integrierte Serienverschaltung.....	128
5.3	Weitere Dünnschichtzellen	130
5.3.1	Zellen aus Cadmium-Tellurid.....	130
5.3.2	CIS-Zellen.....	131

- 5.4 Hybride Waferzellen 133
 - 5.4.1 Kombination von c-Si und a-Si (HIT-Zelle) 133
 - 5.4.2 Stapelzellen aus III/V-Halbleitern 134
- 5.5 Sonstige Zellenkonzepte 135
- 5.6 Konzentratorsysteme 135
 - 5.6.1 Prinzip der Strahlungsbündelung 135
 - 5.6.2 Was bringt die Konzentration? 136
 - 5.6.3 Beispiele von Konzentratorsystemen 137
 - 5.6.4 Vor- und Nachteile von Konzentratorsystemen 138
- 5.7 Ökologische Fragestellungen zur Zellen- und Modulherstellung 138
 - 5.7.1 Umweltauswirkungen bei Herstellung und Betrieb 138
 - 5.7.1.1 Beispiel Cadmium-Tellurid 138
 - 5.7.1.2 Beispiel Silizium 139
 - 5.7.2 Verfügbarkeit der Materialien 140
 - 5.7.2.1 Silizium 140
 - 5.7.2.2 Cadmium-Tellurid 140
 - 5.7.2.3 CIS 141
 - 5.7.2.4 III/V-Halbleiter 141
 - 5.7.3 Energierücklaufzeit und Erntefaktor 142
- 5.8 Zusammenfassung 145

6 Solarmodule und Solargeneratoren 147

- 6.1 Eigenschaften von Solarmodulen 147
 - 6.1.1 Solarzellenkennlinie in allen vier Quadranten 147
 - 6.1.2 Parallelschaltung von Zellen 148
 - 6.1.3 Reihenschaltung von Zellen 149
 - 6.1.4 Einsatz von Bypassdioden 150
 - 6.1.4.1 Reduzierung von Verschattungsverlusten 150
 - 6.1.4.2 Vermeidung von Hotspots 152
 - 6.1.5 Typische Kennlinien von Solarmodulen 155
 - 6.1.5.1 Variation der Bestrahlungsstärke 155
 - 6.1.5.2 Temperaturverhalten 156
 - 6.1.6 Sonderfall Dünnschichtmodule 157
 - 6.1.7 Beispiele von Datenblattangaben 159
- 6.2 Verschaltung von Solarmodulen 160
 - 6.2.1 Parallelschaltung von Strings 160
 - 6.2.2 Was passiert bei Verkabelungsfehlern? 160

6.2.3	Verluste durch Mismatching	161
6.2.4	Schlaue Verschaltung bei Verschattung	162
6.3	Gleichstrom-Komponenten.....	163
6.3.1	Prinzipieller Anlagenaufbau	163
6.3.2	Gleichstromverkabelung	165
6.4	Anlagentypen	166
6.4.1	Freilandanlagen.....	167
6.4.2	Flachdachanlagen	169
6.4.3	Schrägdachanlagen	170
6.4.4	Fassadenanlagen	172
7	Photovoltaische Systemtechnik	174
7.1	Solargenerator und Last	174
7.1.1	Widerstandslast	174
7.1.2	DC/DC-Wandler	175
7.1.2.1	Idee.....	175
7.1.2.2	Tiefsetzsteller	175
7.1.2.3	Hochsetzsteller	178
7.1.3	MPP-Tracker.....	180
7.2	Netzgekoppelte Systeme	181
7.2.1	Einspeisevarianten	181
7.2.2	Anlagekonzepte	182
7.2.3	Aufbau von Wechselrichtern	183
7.2.3.1	Aufgaben des Wechselrichters	183
7.2.3.2	Netzgeführte und selbstgeführte Wechselrichter	183
7.2.3.3	Trafoloser Wechselrichter	184
7.2.3.4	Wechselrichter mit Netztrafo	186
7.2.3.5	Wechselrichter mit HF-Trafo	187
7.2.3.6	Dreiphasige Einspeisung.....	187
7.2.3.7	Weitere schlaue Konzepte.....	189
7.2.4	Wirkungsgrad von Wechselrichtern	190
7.2.4.1	Umwandlungswirkungsgrad	190
7.2.4.2	Europäischer Wirkungsgrad	191
7.2.4.3	Schlaues MPP-Tracking	193
7.2.5	Dimensionierung von Wechselrichtern	193
7.2.5.1	Leistungsdimensionierung	193
7.2.5.2	Spannungsdimensionierung	195
7.2.5.3	Stromdimensionierung	196

7.2.6	Anforderungen der Netzbetreiber	196
7.2.6.1	Vermeidung von Inselbetrieb	196
7.2.6.2	Maximale Einspeiseleistung	198
7.2.7	Sicherheitsaspekte	198
7.2.7.1	Erdung des Generators und Blitzschutz	198
7.2.7.2	Brandschutz	198
7.3	Inselsysteme	199
7.3.1	Prinzipieller Aufbau	199
7.3.2	Akkumulatoren	200
7.3.2.1	Prinzip des Blei-Säure-Akkus	200
7.3.2.2	Typen von Bleiakkus	202
7.3.2.3	Akkukapazität	203
7.3.2.4	Spannungsverlauf	204
7.3.3	Laderegler	205
7.3.3.1	Serienregler	205
7.3.3.2	Shuntregler	205
7.3.3.3	MPP-Laderegler	206
7.3.3.4	Produktbeispiele	206
7.3.4	Beispiele von Inselsystemen	207
7.3.4.1	Solar Home Systems	207
7.3.4.2	Hybridsysteme	209
7.3.5	Dimensionierung von Inselanlagen	210
7.3.5.1	Erfassung des Stromverbrauchs	210
7.3.5.2	Dimensionierung des PV-Generators	211
7.3.5.3	Auswahl des Akkus	213

8 Photovoltaische Messtechnik.....215

8.1	Messung solarer Strahlung	215
8.1.1	Globalstrahlungssensoren	215
8.1.1.1	Pyranometer	215
8.1.1.2	Strahlungssensoren aus Solarzellen	217
8.1.2	Messung von Direkt- und Diffusstrahlung	218
8.2	Leistungsmessung von Solarmodulen	219
8.2.1	Aufbau eines Solarmodul-Leistungsprüfstands	219
8.2.2	Güteklassen von Modulflashern	220
8.2.3	Bestimmung der Modulparameter	221

8.3	Peakleistungsmessung vor Ort	222
8.3.1	Prinzip der Peakleistungsmessung	222
8.3.2	Möglichkeiten und Grenzen des Messprinzips	223
8.4	Thermographie-Messtechnik	224
8.4.1	Prinzip der Infrarot-Temperaturmessung	224
8.4.2	Hell-Thermographie von Solarmodulen	225
8.4.3	Dunkel-Thermographie	227
8.5	Elektrolumineszenz-Messtechnik	228
8.5.1	Messprinzip	228
8.5.2	Beispiele von Aufnahmen	229

9 Planung und Betrieb netzgekoppelter Anlagen.....231

9.1	Planung und Dimensionierung	231
9.1.1	Standortwahl	231
9.1.2	Verschattungen	232
9.1.2.1	Verschattungsanalyse	232
9.1.2.2	Nahverschattungen	233
9.1.2.3	Eigenverschattungen	234
9.1.2.4	Optimierte Stringverschaltung	235
9.1.3	Anlagendimensionierung mit Simulationsprogrammen	236
9.1.3.1	Wechselrichter-Auslegungstools	236
9.1.3.2	Simulationsprogramme für Photovoltaikanlagen	237
9.2	Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen	238
9.2.1	Das Erneuerbare-Energien-Gesetz	239
9.2.2	Renditeberechnung	239
9.2.2.1	Eingangsgrößen	239
9.2.2.2	Amortisationszeit	240
9.2.2.3	Objektrendite	240
9.2.2.4	Weitere Einflussgrößen	242
9.3	Überwachung, Monitoring und Visualisierung	243
9.3.1	Methoden zur Anlagenüberwachung	243
9.3.2	Monitoring von PV-Anlagen	244
9.3.2.1	Spezifische Erträge	244
9.3.2.2	Verluste	245
9.3.2.3	Performance Ratio	245
9.3.2.4	Konkrete Maßnahmen zum Monitoring	246
9.3.3	Visualisierung	246

9.4	Betriebsergebnisse von konkreten Anlagen.....	247
9.4.1	Schrägdachanlage aus dem Jahre 1996	247
9.4.2	Schrägdachanlage aus dem Jahre 2002	249
9.4.3	Flachdachanlage aus dem Jahre 2008.....	250
10	Ausblick	251
10.1	Potential der Photovoltaik.....	251
10.1.1	Theoretisches Potential	251
10.1.2	Technisch nutzbare Strahlungsenergie	251
10.1.3	Technisches Stromerzeugungspotential	253
10.1.4	Photovoltaik versus Biomasse	254
10.2	Effiziente Förderinstrumente	255
10.3	Preisentwicklung	256
10.4	Überlegungen zur zukünftigen Energieversorgung.....	258
10.4.1	Bisherige Entwicklung der erneuerbaren Energien	258
10.4.2	Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien	258
10.4.3	Optionen zur Speicherung von elektrischer Energie	260
10.4.4	Anforderungen an die Netze	262
10.5	Fazit	263
11	Übungsaufgaben	264
12	Anhang	274
12.1	Checkliste zu Planung, Installation und Betrieb einer Photovoltaikanlage	274
12.2	Im Buch verwendete Abkürzungen	276
12.3	Physikalische Konstanten/Materialparameter	277
12.4	Literatur.....	278
12.5	Weiterführende Informationen zur Photovoltaik	285
	Index	287