

Inhaltsverzeichnis

1	Kontext	1
1.1	Energie	2
1.2	Grundprobleme des globalen Energiesystems	6
1.2.1	Begrenztheit der Ressourcen	7
1.2.2	Gerechtigkeit der Verteilung	8
1.2.3	Klimawandel	9
1.2.4	Lösungsansätze	11
1.3	Szenarien einer zukünftigen Entwicklung	16
1.3.1	Energiepotentiale	16
1.3.2	Szenarien und Prognosen	18
1.3.3	Beispiel: Leitszenario	21
1.3.4	Beispiel: Energiesystem D	26
1.4	Exkurse	28
1.4.1	Externe Kosten der Energieerzeugung	29
1.4.2	Kernenergie	32
1.4.3	Kernfusion	33
1.4.4	CO ₂ -Abtrennung	34
	Literaturverzeichnis	35
2	Energieeffizienz	37
2.1	Ansätze zur Energiebedarfsreduktion	37
2.2	Energieeffizienz von Gebäuden	44
2.2.1	Gesetzgeberische Maßnahmen	44
2.2.2	Energetische Bewertung von Gebäuden	49
2.2.3	Berechnungsansätze	60
2.3	Energieeffizienz der Wärmebereitstellung	65
2.3.1	Sanierungsmaßnahmen	65
2.3.2	Innovative Wärmebereitstellung	69
2.3.3	Wärmeerzeugung in Kraft-Wärmekopplung	80
2.4	Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen	89
2.4.1	Grundlagen der Investitionsrechnung	90

2.4.2	Anwendungsbeispiele zur Wirtschaftlichkeit	97
2.5	Anwendungsbeispiel für eine Energieeffizienzanalyse	99
	Literaturverzeichnis	107
3	Regenerative Energiequellen	111
3.1	Strahlungsangebot der Sonne	112
3.1.1	Strahlung und Materie	112
3.1.2	Strahlungsquelle Sonne	114
3.1.3	Einfluss der Erdatmosphäre	120
3.1.4	Direktstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	125
3.1.5	Global- und Diffusstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	130
3.1.6	Jahressumme der Globalstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	132
3.1.7	Auslegungshilfsmittel Sonnenstandsdiagramm	134
3.1.8	Auslegungshilfsmittel Strahlungsatlas	135
3.1.9	Messung der Einstrahlung	137
3.2	Erdwärme	139
3.2.1	Oberflächennahe Nutzung	144
3.2.2	Tiefe Erdwärme	160
3.3	Biomasse	163
3.3.1	Biomassebereitstellung	164
3.3.2	Biomasseproduktion	165
3.3.3	Physikalische und chemische Charakterisierung von Bioenergieträgern	166
3.3.4	Ökologie und Nachhaltigkeit	169
3.4	Windenergie	172
3.4.1	Windentstehung	173
3.4.2	Leistung des Windes	173
3.4.3	Grenzschicht	175
3.4.4	Häufigkeitsverteilung	178
3.4.5	Die Turbulenz der Windströmung	183
3.4.6	Windklassen	184
3.4.7	Messung der Windverhältnisse	185
3.5	Wasserkraft	187
3.5.1	Wasserkreislauf	187
3.5.2	Nutzbare Niederschlagsanteil	187
3.5.3	Arbeitsvermögen des Wassers	188
3.5.4	Weltweites Nutzungspotential	189
	Literaturverzeichnis	190
4	Photovoltaik	193
4.1	Geschichte der Photovoltaik	195
4.2	Physikalische Grundlagen	197
4.2.1	Einführung in die Halbleiterttheorie	197

4.2.2	Generations- und Rekombinationsprozesse	204
4.2.3	Die Solarzelle als p-n-Übergang	207
4.2.4	Modellbildung für eine reale Solarzelle	214
4.2.5	Amorphe Halbleitermaterialien	219
4.3	Komponenten und Technologien	222
4.3.1	Herstellungsverfahren für kristalline Si-Solarzellen	222
4.3.2	Herstellungsverfahren für Dünnschicht-Solarzellen	225
4.3.3	Solarzellen der dritten Generation	229
4.3.4	Solarmodule	233
4.3.5	Aufständerung	234
4.3.6	Stromrichter	239
4.4	Systemtechnik	245
4.4.1	Verschaltung von Solarzellen zu Solargeneratoren	245
4.4.2	Regelung von Solargeneratoren	247
4.4.3	Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen	250
4.4.4	Photovoltaik-Inselanlagen	253
4.5	Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Photovoltaikmodulen (Sebastian Voswinckel)	254
4.5.1	Leistungsgarantie und Lebensdauer	254
4.5.2	Degradation	260
4.6	Auslegungsbeispiele	274
4.6.1	Inselnetz Flanitzhütte	274
4.6.2	PV-Kraftwerk Nentzelsrode	276
	Literaturverzeichnis	277
5	Solarthermie	279
5.1	Geschichte der solarthermischen Energienutzung	280
5.2	Physikalische Grundlagen	283
5.2.1	Strahlungsphysikalische Grundlagen	284
5.2.2	Strahlungstransmission	287
5.2.3	Absorption und Strahlungswandlung	294
5.2.4	Strahlungskonzentration	298
5.2.5	Wärmetransport im Kollektor	303
5.2.6	Kenn- und Leistungsdaten von Solarkollektoren	319
5.3	Komponenten	329
5.3.1	Kollektoren	329
5.3.2	Absorber	344
5.3.3	Transparente Abdeckungen	355
5.3.4	Kollektorkreis	361
5.3.5	Speicher	366
5.3.6	Weitere Komponenten	373
5.3.7	Zukünftige Entwicklungslinien	380
5.4	Systemtechnik	382
5.4.1	Betriebsarten	383
5.4.2	System-Kennwerte	386

5.4.3	Exkurs – Trinkwassererwärmung und Hygiene	395
5.4.4	Solare Trinkwassererwärmung im Ein- und Zweifamilienhaus	396
5.4.5	Große Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung	397
5.4.6	Solare Heizungsunterstützung	405
5.4.7	Solare Prozesswärme	407
5.4.8	Solares Kühlen	415
5.4.9	Solare Fernwärme	419
5.4.10	Solare Nahwärme	420
5.4.11	Solare Kraftwerke	422
5.5	Solarwirtschaft	424
5.5.1	Der Markt für Solarthermie	424
5.5.2	Gesetzliche Regelungen und Fördermaßnahmen	427
5.5.3	Wirtschaftlichkeit	429
	Literaturverzeichnis	438
6	Geothermie	445
6.1	Geschichte der geothermischen Energienutzung	449
6.2	Grundlagen	451
6.2.1	Modellierung von Erdwärmesonden	452
6.2.2	Thermodynamik der Wärmepumpen	459
6.2.3	Thermodynamik der geothermischen Stromerzeugung	474
6.3	Komponenten und Systemtechnik	489
6.3.1	Erdwärmesonden	489
6.3.2	Erdkollektoren	501
6.3.3	Grundwasserbrunnen	506
6.3.4	Wärmepumpen	507
6.4	Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpenanlagen	511
6.5	Auslegungsbeispiele	514
6.5.1	Geothermische Beheizung eines Einfamilienhauses	514
6.5.2	Geothermisches Kraftwerk Ribeira Grande, Azoren	516
	Literaturverzeichnis	519
7	Biomasse	521
7.1	Geschichte der energetischen Biomassennutzung	522
7.2	Thermochemische Umwandlung	526
7.2.1	Verbrennung	526
7.2.2	Emissionen aus der Biomasseverbrennung	529
7.2.3	Anwendungsbereiche und Technologien zur Wärme- und Stromerzeugung	531
7.2.4	Verbrennung von Halmgut und Getreide	535
7.2.5	Verbrennung von Rest- und Abfallstoffen	536
7.2.6	Verbrennung von Biomasse in Großfeuerungsanlagen	537
7.2.7	Kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom aus Biomasse	540

7.2.8	Biomassevergasung: Grundlagen und Anwendung	544
7.3	Biochemische Umwandlung	550
7.3.1	Grundlagen der Biogaserzeugung	551
7.3.2	Dimensionierung von Biogasanlagen	559
7.3.3	Technik zur Erzeugung von Biogas	563
7.3.4	Technik zur Nutzung von Biogas	566
7.4	Flüssige Bioenergieträger: Biokraftstoffe	569
7.4.1	Entwicklung des weltweiten Biokraftstoffmarkts	571
7.4.2	Biokraftstoffe der 1. Generation: Pflanzenöle	572
7.4.3	Biokraftstoffe der 1. Generation: Biodiesel	579
7.4.4	Biokraftstoffe der 2. Generation: Hydrierte Pflanzenöle	582
7.4.5	Erzeugung von Bioethanol	585
7.4.6	Biokraftstoffe der 2. Generation: synthetische Biokraftstoffe	600
7.4.7	Biokraftstoffe der 3. Generation	612
	Literaturverzeichnis	615
8	Windkraftanlagen	619
8.1	Geschichte der Windenergienutzung	622
8.2	Physikalische Grundlagen	624
8.2.1	Die Betzche Theorie	624
8.2.2	Schwingungsverhalten von Windenergieanlagen	642
8.3	Komponenten	654
8.3.1	Rotorblätter	654
8.3.2	Getriebe	667
8.3.3	Antriebsstrang	677
8.3.4	Turm	683
8.3.5	Generator	688
8.4	Systemtechnik	691
8.4.1	Anlagenkennlinie	691
8.4.2	Regelungskonzepte	692
8.4.3	Condition Monitoring Systeme	696
8.4.4	Genehmigungsverfahren (Tanja Schabbach)	698
8.4.5	Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen	703
8.4.6	Auslegungsbeispiel	710
	Literaturverzeichnis	713
9	Wasserkraftanlagen	717
9.1	Einführung	717
9.2	Typisierung und Aufbau	718
9.3	Wasserturbinen	718
9.3.1	Die Peltonturbine	720
9.3.2	Die Francisturbine	722
9.3.3	Die Kaplan-turbine	723
9.3.4	Die Eulersche Turbinenhauptgleichung	724
	Literaturverzeichnis	726

10	Energiespeicher	727
	10.1 Elektrische Speichertechnologien	728
	10.1.1 Mechanische Energiespeicher	729
	10.1.2 Elektrische Energiespeicher	733
	10.1.3 Elektrochemische Energiespeicher	735
	10.2 Thermische Speichertechnologien	739
	10.2.1 Sensible Speicher	740
	10.2.2 Latentwärmespeicher	745
	10.2.3 Thermochemische Speicher	754
	10.3 Chemische Speichertechnologien	760
	10.3.1 Power-to-Gas	760
	10.3.2 Power-to-Liquid	766
	Literaturverzeichnis	767
11	Elektrische Energiesysteme	771
	11.1 Struktur des elektrischen Energieversorgungssystems	772
	11.2 Integration von Photovoltaikanlagen	778
	11.3 Integration von Windkraftanlagen	781
	Literaturverzeichnis	783
12	Thermische Energiesysteme	785
	12.1 Struktur der thermischen Energieversorgung	786
	12.2 Integration von Kraft-Wärme-Kopplung, Biomasse und Geothermie in Nahwärmenetze	788
	12.3 Integration solarer Wärme in Nahwärmenetze	789
	12.4 Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz	791
	12.5 Anwendungsbeispiel Kommunale Fernwärme (Pascal Leibbrandt) .	792
	Literaturverzeichnis	796
13	Mobilität	797
	13.1 Kraftstoffe	798
	13.1.1 Biokraftstoffe	798
	13.1.2 Wasserstoff	804
	13.2 Elektrofahrzeuge	804
	13.2.1 Batteriegespeiste Elektrofahrzeuge	805
	13.2.2 Brennstoffzellengespeiste Elektrofahrzeuge	806
	Literaturverzeichnis	807
14	Thermodynamische Bewertung regenerativer Energiewandlungen . . .	809
	14.1 Geschichte der Energiewandlung	810
	14.2 Die Energie	813
	14.3 Die Entropie	821
	14.4 Die Energie des Systems	828
	14.5 Gewollte und ungewollte Energiewandlungen	834
	14.5.1 Energiewandlung innerhalb des Systems	834
	14.5.2 Energietransport über die Systemgrenze	836

14.5.3 Ungewollte Energieumwandlungen (Dissipation).....	844
14.6 Energiebilanzen für geschlossene und offene Systeme	850
14.6.1 Geschlossene Systeme	850
14.6.2 Offene Systeme.....	852
14.6.3 Exergie, Anergie, Wirkungs- und Nutzungsgrad.....	855
14.7 Stoffeigenschaften	863
14.7.1 Zustandsgleichungen	864
14.7.2 Idealgas	867
14.7.3 Reale Gase	869
14.7.4 Ideale Flüssigkeiten und Feststoffe	871
14.7.5 Reale Flüssigkeiten und Feststoffe	872
14.7.6 Nassdampf.....	873
14.7.7 Ideale Gasgemische	875
14.7.8 Binäre Gemische	882
14.8 Thermodynamische Maschinen und Komponenten	884
14.8.1 Pumpen	885
14.8.2 Verdichter	887
14.8.3 Turbinen	889
14.8.4 Wärmeübertrager	890
14.8.5 Drosselventile	893
14.8.6 Düse und Diffusor	894
14.8.7 Wärmeerzeuger.....	895
14.9 Kreisprozesse.....	897
14.9.1 Bilanzierung des Kreisprozesses.....	897
14.9.2 Kreisprozess-Varianten	902
14.10 Thermodynamik der solaren Energiewandlung	905
14.10.1 Thermodynamik der Strahlung	905
14.10.2 Solarthermischer Umwandlungspfad	908
14.10.3 Photovoltaischer Umwandlungspfad	912
Literaturverzeichnis	917
15 Apokryphen	919
15.1 Historische Perpetua mobilia	919
15.2 Erfinder.....	922
15.3 Esoteriker	925
15.4 Lösungen	926
Literaturverzeichnis	929
Sachverzeichnis	931