

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	15
1.3.1	Energiepotenziale	16
1.3.2	Szenarien und Prognosen	18
1.3.3	Beispiel: Leitszenario	21
1.4	Exkurse	25
1.4.1	Externe Kosten der Energieerzeugung	26
1.4.2	Kernenergie	28
1.4.3	Kernfusion	30
1.4.4	CO ₂ -Abtrennung	31
	Literaturverzeichnis	32
2	Energieeffizienz	35
2.1	Ansätze zur Energiebedarfsreduktion	36
2.1.1	Vermeidung	36
2.1.2	Verhaltensänderung	37
2.1.3	Energieeffizienzsteigerung	38
2.1.4	Ersatz fossiler Energieträger	40
2.1.5	Gesetzgeberische Maßnahmen zur Energieeffizienz	40
2.2	Energieeffizienz in Gebäuden	42
2.2.1	Gesetzgeberische Maßnahmen	43
2.2.2	Energetische Bewertung von Gebäuden	47
2.2.3	Berechnungsansätze	58
2.3	Energieeffizienz im Wärmebereich	63
2.3.1	Sanierungsmaßnahmen	63

2.3.2	Innovative Wärmebereitstellung	67
2.3.3	Wärmeerzeugung in Kraft-Wärmekopplung	79
2.4	Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen	87
2.4.1	Grundlagen der Investitionsrechnung	88
2.4.2	Anwendungsbeispiele zur Wirtschaftlichkeit	95
2.5	Anwendungsbeispiel für eine Energieeffizienzanalyse	97
	Literaturverzeichnis	105
3	Regenerative Energiequellen	109
3.1	Strahlungsangebot der Sonne	110
3.1.1	Strahlung und Materie	110
3.1.2	Strahlungsquelle Sonne	112
3.1.3	Einfluss der Erdatmosphäre	118
3.1.4	Direktstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	123
3.1.5	Global- und Diffusstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	128
3.1.6	Jahressumme der Globalstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	130
3.1.7	Auslegungshilfsmittel Sonnenstandsdiagramm	132
3.1.8	Auslegungshilfsmittel Strahlungsatlas	133
3.1.9	Messung der Einstrahlung	135
3.2	Erdwärme	137
3.2.1	Oberflächennahe Nutzung	142
3.2.2	Tiefe Erdwärme	157
3.3	Biomasse	160
3.3.1	Biomassebereitstellung	161
3.3.2	Biomasseproduktion	162
3.3.3	Physikalische und chemische Charakterisierung von Bioenergieträgern	163
3.3.4	Ökologie und Nachhaltigkeit	167
3.4	Windenergie	169
3.4.1	Windentstehung	170
3.4.2	Leistung des Windes	170
3.4.3	Grenzschicht	172
3.4.4	Häufigkeitsverteilung	175
3.4.5	Die Turbulenz der Windströmung	180
3.4.6	Windklassen	181
3.4.7	Messung der Windverhältnisse	182
3.5	Wasserkraft	184
3.5.1	Wasserkreislauf	184
3.5.2	Nutzbarer Niederschlagsanteil	184
3.5.3	Arbeitsvermögen des Wassers	185
3.5.4	Weltweites Nutzungspotenzial	186
	Literaturverzeichnis	187

4	Photovoltaik	191
4.1	Geschichte der Photovoltaik	193
4.2	Physikalische Grundlagen	195
4.2.1	Einführung in die Halbleitertheorie	195
4.2.2	Generations- und Rekombinationsprozesse	202
4.2.3	Die Solarzelle als p-n-Übergang	205
4.2.4	Modellbildung für eine reale Solarzelle	212
4.2.5	Amorphe Halbleitermaterialien	217
4.3	Komponenten und Technologien	220
4.3.1	Herstellungsverfahren für kristalline Si-Solarzellen	220
4.3.2	Herstellungsverfahren für Dünnschicht-Solarzellen	223
4.3.3	Solarzellen der dritten Generation	227
4.3.4	Solarmodule	231
4.3.5	Aufständigung	232
4.3.6	Stromrichter	236
4.4	Systemtechnik	243
4.4.1	Verschaltung von Solarzellen zu Solargeneratoren	243
4.4.2	Regelung von Solargeneratoren	245
4.4.3	Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen	248
4.4.4	Photovoltaik-Insulanlagen	250
4.5	Auslegungsbeispiele	251
4.5.1	Inselnetz Flanitzhütte	251
4.5.2	PV-Kraftwerk Nentzelsrode	253
	Literaturverzeichnis	254
5	Solarthermie	257
5.1	Geschichte der solarthermischen Energienutzung	258
5.2	Physikalische Grundlagen	261
5.2.1	Strahlungsphysikalische Grundlagen	262
5.2.2	Strahlungstransmission	264
5.2.3	Absorption und Strahlungswandlung	272
5.2.4	Strahlungskonzentration	276
5.2.5	Wärmetransport im Kollektor	280
5.2.6	Kollektormodellierung	296
5.2.7	Kenn- und Leistungsdaten von Solarkollektoren	301
5.3	Komponenten	310
5.3.1	Kollektoren	310
5.3.2	Absorber	319
5.3.3	Transparente Abdeckungen	327
5.3.4	Kollektorkreis	331
5.3.5	Speicher	335
5.3.6	Weitere Komponenten	341
5.3.7	Zukünftige Entwicklungslinien	347
5.4	Systemtechnik	349
5.4.1	Betriebsarten	349

5.4.2	System-Kennwerte	352
5.4.3	Exkurs – Trinkwassererwärmung und Hygiene	359
5.4.4	Solare Trinkwassererwärmung im Ein- und Zweifamilienhaus	362
5.4.5	Große Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung	363
5.4.6	Solare Heizungsunterstützung	367
5.4.7	Solare Prozesswärme	370
5.4.8	Solare Kraftwerke	375
5.5	Solarwirtschaft	377
5.5.1	Der Markt für Solarthermie	378
5.5.2	Gesetzliche Regelungen und Fördermaßnahmen	380
5.5.3	Wirtschaftlichkeit	383
	Literaturverzeichnis	391
6	Geothermie	397
6.1	Geschichte der geothermischen Energienutzung	401
6.2	Grundlagen	403
6.2.1	Modellierung von Erdwärmesonden	404
6.2.2	Thermodynamik der Wärmepumpen	411
6.2.3	Thermodynamik der geothermischen Stromerzeugung	425
6.3	Komponenten und Systemtechnik	439
6.3.1	Erdwärmesonden	440
6.3.2	Erdkollektoren	451
6.3.3	Grundwasserbrunnen	456
6.3.4	Wärmepumpen	458
6.4	Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpenanlagen	460
6.5	Auslegungsbeispiele	463
6.5.1	Geothermische Beheizung eines Einfamilienhauses	463
6.5.2	Geothermisches Kraftwerk Ribeira Grande, Azoren	465
	Literaturverzeichnis	468
7	Biomasse	471
7.1	Geschichte der energetischen Biomassenutzung	472
7.2	Thermochemische Umwandlung	474
7.2.1	Verbrennung	474
7.2.2	Emissionen aus der Biomasseverbrennung	477
7.2.3	Anwendungsbereiche und Technologien zur Wärme- und Stromerzeugung	478
7.2.4	Besonderheiten bei der Verbrennung von Halmgut und Getreide	483
7.2.5	Technologien zur Verbrennung von Biomasse in Großfeuerungsanlagen	484
7.2.6	Kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom aus Biomasse	487
7.2.7	Biomassevergásung: Grundlagen und Anwendung	490

7.3	Biochemische Umwandlung	497
7.3.1	Grundlagen der Biogaserzeugung	497
7.3.2	Dimensionierung von Biogasanlagen	505
7.3.3	Technik zur Erzeugung von Biogas	509
7.3.4	Technik zur Nutzung von Biogas	512
7.4	Flüssige Bioenergieträger: Biokraftstoffe	517
7.4.1	Entwicklung des weltweiten Biokraftstoffmarkts	518
7.4.2	Biokraftstoffe der 1. Generation: Pflanzenöle	519
7.4.3	Biokraftstoffe der 1. Generation: Biodiesel	526
7.4.4	Biokraftstoffe der 2. Generation: Hydrierte Pflanzenöle	530
7.4.5	Erzeugung von Bioethanol	532
7.4.6	Biokraftstoffe der 2. Generation: synthetische Biokraftstoffe	543
7.4.7	Biokraftstoffe der 3. Generation	555
	Literaturverzeichnis	558
8	Windkraftanlagen	561
8.1	Geschichte der Windenergienutzung	564
8.2	Physikalische Grundlagen	566
8.2.1	Die Betzsche Theorie	566
8.2.2	Schwingungsverhalten von Windenergieanlagen	584
8.3	Komponenten	596
8.3.1	Rotorblätter	596
8.3.2	Getriebe	609
8.3.3	Antriebsstrang	619
8.3.4	Turm	625
8.3.5	Generator	630
8.4	Systemtechnik	633
8.4.1	Regelungskonzepte	633
8.4.2	Condition Monitoring Systeme	636
8.4.3	Genehmigungsverfahren (Tanja Schabbach)	638
8.4.4	Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen	644
8.4.5	Auslegungsbeispiel	652
	Literaturverzeichnis	654
9	Wasserkraftanlagen	659
9.1	Einführung	659
9.2	Typisierung und Aufbau	660
9.3	Wasserturbinen	660
9.3.1	Die Peltonturbine	662
9.3.2	Die Francisturbine	664
9.3.3	Die Kaplan turbine	665
9.3.4	Die Eulersche Turbinenhauptgleichung	666
	Literaturverzeichnis	668

10	Energiespeicher	669
10.1	Elektrische Speichertechnologien	670
10.1.1	Mechanische Energiespeicher	671
10.1.2	Elektrische Energiespeicher	675
10.1.3	Elektrochemische Energiespeicher	677
10.2	Thermische Speichertechnologien	681
10.2.1	Sensible Speicher	682
10.2.2	Latentwärmespeicher	687
10.2.3	Thermochemische Speicher	696
	Literaturverzeichnis	702
11	Elektrische Energiesysteme	705
11.1	Struktur des elektrischen Energieversorgungssystems	706
11.2	Integration von Photovoltaikanlagen	712
11.3	Integration von Windkraftanlagen	715
	Literaturverzeichnis	717
12	Thermische Energiesysteme	719
12.1	Struktur der thermischen Energieversorgung	720
12.2	Integration von Kraft-Wärme-Kopplung, Biomasse und Geothermie in Nahwärmenetze	722
12.3	Integration solarer Wärme in Nahwärmenetze	723
12.4	Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz	725
12.5	Anwendungsbeispiel Kommunale Fernwärme (Pascal Leibbrandt)	726
	Literaturverzeichnis	729
13	Mobilität	731
13.1	Kraftstoffe	733
13.1.1	Biokraftstoffe	733
13.1.2	Wasserstoff	737
13.2	Elektrofahrzeuge	737
13.2.1	Batteriegespeiste Elektrofahrzeuge	738
13.2.2	Brennstoffzellengespeiste Elektrofahrzeuge	739
	Literaturverzeichnis	740
14	Thermodynamische Bewertung Regenerativer Energiewandlungen	741
14.1	Geschichte der Energiewandlung	741
14.2	Die Energie	744
14.3	Die Entropie	752
14.4	Die Energie des Systems	759
14.5	Gewollte und ungewollte Energiewandlungen	765
14.5.1	Energiewandlung innerhalb des Systems	765
14.5.2	Energietransport über die Systemgrenze	768
14.5.3	Ungewollte Energieumwandlungen (Dissipation)	774
14.6	Energiebilanzen für geschlossene und offene Systeme	782
14.6.1	Geschlossene Systeme	782

14.6.2	Offene Systeme	784
14.6.3	Exergie, Anergie, Wirkungs- und Nutzungsgrad	787
14.7	Stoffeigenschaften	795
14.7.1	Zustandsgleichungen	795
14.7.2	Idealgas	799
14.7.3	Reale Gase	801
14.7.4	Ideale Flüssigkeiten und Feststoffe	803
14.7.5	Reale Flüssigkeiten und Feststoffe	804
14.7.6	Nassdampf	805
14.7.7	Ideale Gasgemische	807
14.7.8	Binäre Gemische	813
14.8	Thermodynamische Maschinen und Komponenten	815
14.8.1	Pumpen	816
14.8.2	Verdichter	818
14.8.3	Turbinen	820
14.8.4	Wärmeübertrager	821
14.8.5	Drossel	824
14.8.6	Düse und Diffusor	824
14.8.7	Wärmeerzeuger	826
14.9	Kreisprozesse	828
14.9.1	Bilanzierung des Kreisprozesses	828
14.9.2	Kreisprozess-Varianten	833
14.10	Thermodynamik der solaren Energiewandlung	836
14.10.1	Thermodynamik der Strahlung	836
14.10.2	Solarthermischer Umwandlungspfad	839
14.10.3	Photovoltaischer Umwandlungspfad	843
	Literaturverzeichnis	849
	Sachverzeichnis	851