

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kontext</b> .....	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 <sub>2</sub> -Abtrennung .....	34
	Literaturverzeichnis .....	35
<b>2</b>	<b>Energieeffizienz</b> .....	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
<b>3</b>	<b>Regenerative Energiequellen .....</b>	<b>111</b>
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	Nutzbarer Niederschlagsanteil .....	187
3.5.3	Arbeitsvermögen des Wassers .....	188
3.5.4	Weltweites Nutzungspotential .....	189
	Literaturverzeichnis .....	190
<b>4</b>	<b>Photovoltaik .....</b>	<b>193</b>
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	Aufständigung . . . . .	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
<b>5</b>	<b>Solarthermie . . . . .</b>	<b>279</b>
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
<b>6</b>	<b>Geothermie</b>	<b>445</b>
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
<b>7</b>	<b>Biomasse</b>	<b>521</b>
7.1	Geschichte der energetischen Biomassenutzung	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
<b>8</b>	<b>Windkraftanlagen</b> . . . . .	<b>619</b>
8.1	Geschichte der Windenergienutzung . . . . .	622
8.2	Physikalische Grundlagen . . . . .	624
8.2.1	Die Betzsche 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
<b>9</b>	<b>Wasserkraftanlagen</b> . . . . .	<b>717</b>
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 Turbinen-hauptgleichung . . . . .	724
	Literaturverzeichnis . . . . .	726

<b>10</b>	<b>Energiespeicher</b> .....	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
<b>11</b>	<b>Elektrische Energiesysteme</b> .....	771
11.1	Struktur des elektrischen Energieversorgungssystems .....	772
11.2	Integration von Photovoltaikanlagen .....	778
11.3	Integration von Windkraftanlagen .....	781
	Literaturverzeichnis .....	783
<b>12</b>	<b>Thermische Energiesysteme</b> .....	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
<b>13</b>	<b>Mobilität</b> .....	797
13.1	Kraftstoffe .....	798
13.1.1	Biokraftstoffe .....	798
13.1.2	Wasserstoff .....	804
13.2	Elektrofahrzeuge .....	804
13.2.1	Batteriegeladene Elektrofahrzeuge .....	805
13.2.2	Brennstoffzellengeladene Elektrofahrzeuge .....	806
	Literaturverzeichnis .....	807
<b>14</b>	<b>Thermodynamische Bewertung regenerativer Energiewandlungen</b> ...	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
<b>15 Apokryphen . . . . .</b>	<b>919</b>
15.1 Historische Perpetua mobilia . . . . .	919
15.2 Erfinder . . . . .	922
15.3 Esoteriker . . . . .	925
15.4 Lösungen . . . . .	926
Literaturverzeichnis . . . . .	929
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>931</b>