

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	15
1.3.2	Szenarien und Prognosen	17
1.3.3	Beispiel: Leitszenario 2008	20
1.4	Exkurse	25
1.4.1	Externe Kosten der Energieerzeugung	25
1.4.2	Kernenergie	27
1.4.3	Kernfusion	29
1.4.4	CO ₂ -Abtrennung	30
	Literaturverzeichnis	31
2	Energieeffizienz	33
2.1	Ansätze zur Energiebedarfsreduktion	33
2.2	Energieeffizienz in Gebäuden	36
2.3	Anwendungsbeispiel für eine Energieeffizienzanalyse	41
	Literaturverzeichnis	52
3	Regenerative Energiequellen	53
3.1	Strahlungsangebot der Sonne	54
3.1.1	Strahlung und Materie	54
3.1.2	Strahlungsquelle Sonne	56
3.1.3	Einfluss der Erdatmosphäre	62
3.1.4	Direktstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	67

3.1.5	Global- und Diffusstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	72
3.1.6	Jahressumme der Globalstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	74
3.1.7	Auslegungshilfsmittel Sonnenstandsdiagramm	76
3.1.8	Auslegungshilfsmittel Strahlungsatlas	77
3.1.9	Messung der Einstrahlung	79
3.2	Erdwärme	80
3.2.1	Oberflächennahe Nutzung	85
3.2.2	Tiefe Erdwärme	97
3.3	Biomasse	99
3.3.1	Biomassebereitstellung	100
3.3.2	Biomasseproduktion	102
3.3.3	Physikalische und chemische Charakterisierung von Bioenergieträgern	103
3.3.4	Ökologie und Nachhaltigkeit	107
3.4	Windenergie	110
3.4.1	Windentstehung	110
3.4.2	Leistung des Windes	110
3.4.3	Grenzschicht	112
3.4.4	Häufigkeitsverteilung	113
3.4.5	Messung der Windverhältnisse	114
3.5	Energiepotenzial der Wasserkraft	115
3.5.1	Wasserkreislauf	115
3.5.2	Nutzbarer Niederschlagsanteil	116
3.5.3	Arbeitsvermögen des Wassers	116
3.5.4	Weltweites Nutzungspotenzial	117
	Literaturverzeichnis	118
4	Photovoltaik	121
4.1	Geschichte der Photovoltaik	122
4.2	Physikalische Grundlagen	124
4.2.1	Einführung in die Halbleiterttheorie	124
4.2.2	Generations- und Rekombinationsprozesse	131
4.2.3	Die Solarzelle als p-n-Übergang	134
4.2.4	Modellbildung für eine reale Solarzelle	140
4.3	Komponenten	145
4.3.1	Herstellungsverfahren für kristalline Si-Solarzellen	145
4.3.2	Herstellungsverfahren für Dünnschicht-Solarzellen	147
4.3.3	Solarmodule	149
4.3.4	Aufständigung	150
4.3.5	Stromrichter	155
4.4	Systemtechnik	161
4.4.1	Verschaltung von Solarzellen zu Solargeneratoren	161
4.4.2	Regelung von Solargeneratoren	163

4.4.3	Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen	166
4.4.4	Photovoltaik-Insulanlagen	168
4.5	Auslegungsbeispiele	169
4.5.1	Inselnetz Flanitzhütte	169
4.5.2	PV-Kraftwerk Nentzelsrode	170
	Literaturverzeichnis	172
5	Solarthermie	173
5.1	Geschichte der solarthermischen Energienutzung	174
5.2	Physikalische Grundlagen	177
5.2.1	Strahlungsphysikalische Grundlagen	178
5.2.2	Strahlungstransmission	180
5.2.3	Absorption und Strahlungswandlung	187
5.2.4	Strahlungskonzentration	192
5.2.5	Wärmetransport im Kollektor	196
5.2.6	Kollektormodellierung	209
5.3	Komponenten	213
5.3.1	Absorber	213
5.3.2	Transparente Abdeckungen	220
5.3.3	Kollektoren	223
5.3.4	Kollektorkreis	229
5.4	Systemtechnik	239
5.4.1	Betriebssysteme	239
5.4.2	System-Kennwerte	242
5.4.3	Solare Trinkwassererwärmung im Ein- und Zweifamilienhaus	246
5.4.4	Große Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung	247
5.4.5	Solare Heizungsunterstützung	250
	Literaturverzeichnis	252
6	Geothermie	255
6.1	Geschichte der geothermischen Energienutzung	258
6.2	Grundlagen	261
6.2.1	Modellierung von Erdwärmesonden	262
6.2.2	Thermodynamik der Wärmepumpen	270
6.2.3	Thermodynamik der geothermischen Stromerzeugung	282
6.3	Komponenten und Systemtechnik	295
6.3.1	Erdwärmesonden	295
6.3.2	Erdkollektoren	308
6.3.3	Grundwasserbrunnen	312
6.3.4	Wärmepumpen	314
6.4	Auslegungsbeispiele	315
6.4.1	Geothermische Beheizung eines Einfamilienhauses	315
6.4.2	Geothermisches Kraftwerk Ribeira Grande, Azoren	317
	Literaturverzeichnis	320

7	Biomasse (Joachim Fischer)	323
7.1	Geschichte der energetischen Biomassenutzung	323
7.2	Thermochemische Umwandlung	325
7.2.1	Verbrennung	325
7.2.2	Emissionen aus der Biomasseverbrennung	328
7.2.3	Anwendungsbereiche und Technologien zur Wärme- und Stromerzeugung	330
7.2.4	Besonderheiten bei der Verbrennung von Halmgut und Getreide	335
7.2.5	Technologien zur Verbrennung von Biomasse in Großfeuerungsanlagen	336
7.2.6	Kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom aus Biomasse	339
7.2.7	Biomassevergasung: Grundlagen und Anwendung	342
7.3	Biochemische Umwandlung	348
7.3.1	Grundlagen der Biogaserzeugung	348
7.3.2	Dimensionierung von Biogasanlagen	356
7.3.3	Technik zur Erzeugung von Biogas	360
7.3.4	Technik zur Nutzung von Biogas	363
7.4	Flüssige Bioenergieträger: Biokraftstoffe	367
7.4.1	Pflanzenölkraftstoff und Biodiesel	367
7.4.2	Bioethanol	369
7.4.3	Synthetische Biokraftstoffe	370
	Literaturverzeichnis	373
8	Windkraftanlagen (Thomas Link)	375
8.1	Einführung	376
8.2	Typisierung und Aufbau	377
8.3	Die Betzsche Theorie	380
8.3.1	Die Rankinesche Strahltheorie	380
8.3.2	Aerodynamik des Rotors	387
8.3.3	Die aerodynamischen Verhältnisse am Rotorblatt	390
8.3.4	Die Blattelementmethode	391
8.3.5	Der Wirkungsgrad	394
8.3.6	Die Verwindung der Rotorblätter	398
8.4	Regelungskonzepte	399
8.4.1	Stall-Anlagen	400
8.4.2	Drehzahlvariabler Stall	401
8.4.3	Pitch-Regelung	401
8.4.4	Active-Stall	402
	Literaturverzeichnis	402

9	Wasserkraftanlagen (Thomas Link)	403
9.1	Einführung	403
9.2	Typisierung und Aufbau	404
9.3	Wasserturbinen	404
9.3.1	Die Pelton turbine	406
9.3.2	Die Francisturbine	408
9.3.3	Die Kaplan turbine	409
9.3.4	Die Eulersche Turbinen hauptgleichung	410
	Literaturverzeichnis	412
10	Elektrische Energiesysteme	413
10.1	Struktur des elektrischen Energieversorgungssystems	414
10.2	Integration von Photovoltaikanlagen	417
10.3	Integration von Windkraftanlagen	420
	Literaturverzeichnis	422
11	Thermische Energiesysteme	423
11.1	Struktur der thermischen Energieversorgung	424
11.2	Integration von Kraft-Wärme-Kopplung, Biomasse und Geothermie in Nahwärmenetze	426
11.3	Integration solarer Wärme in Nahwärmenetze	427
11.4	Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz	428
	Literaturverzeichnis	429
12	Mobilität	431
12.1	Kraftstoffe	433
12.1.1	Biokraftstoffe	433
12.1.2	Wasserstoff	436
12.2	Elektrofahrzeuge	437
12.2.1	Batteriegespeiste Elektrofahrzeuge	437
12.2.2	Brennstoffzellengespeiste Elektrofahrzeuge	438
	Literaturverzeichnis	439
13	Thermodynamische Bewertung Regenerativer Energiewandlungen	441
13.1	Die Energie	441
13.2	Die Entropie	448
13.3	Erscheinungsformen der Energie	451
13.4	Gewollte und ungewollte Energiewandlungen	457
13.4.1	Energiewandlung innerhalb des Systems	457
13.4.2	Energietransport über die Systemgrenze	460
13.4.3	Ungewollte Energieumwandlungen	465
13.5	Energiebilanzen für geschlossene und offene Systeme	471
13.5.1	Geschlossene Systeme	471
13.5.2	Offene Systeme	472
13.5.3	Exergie, Anergie, Wirkungs- und Nutzungsgrad	475
13.6	Stoffeigenschaften	483

13.6.1	Thermische Zustandsgleichungen	484
13.6.2	Kalorische Zustandsgleichungen	485
13.6.3	Idealgas	486
13.6.4	Reale Gase	488
13.6.5	Ideale Flüssigkeiten und Feststoffe	490
13.6.6	Reale Flüssigkeiten und Feststoffe	490
13.7	Thermodynamische Maschinen und Komponenten	492
13.7.1	Pumpen	492
13.7.2	Verdichter	494
13.7.3	Turbinen	495
13.7.4	Wärmeübertrager	496
13.7.5	Drossel	498
13.8	Kreisprozesse	499
13.9	Thermodynamik der solaren Energiewandlung	505
13.9.1	Thermodynamik der Strahlung	505
13.9.2	Solarthermischer Umwandlungspfad	508
13.9.3	Photovoltaischer Umwandlungspfad	512
	Literaturverzeichnis	518
	Sachverzeichnis	521