
Inhalt

Vorwort zur ersten Auflage	XIII
Vorwort zur dreizehnten Auflage	XV
1 Energie und Klimaschutz	1
1.1 Der Begriff Energie	1
1.2 Entwicklung des Energiebedarfs	7
1.2.1 Entwicklung des Weltenergiebedarfs	7
1.2.2 Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland	10
1.3 Reichweite konventioneller Energieträger	13
1.4 Der Treibhauseffekt	15
1.5 Kernenergie contra Treibhauseffekt	23
1.5.1 Kernspaltung	23
1.5.2 Kernfusion	27
1.6 Nutzung erneuerbarer Energien	28
1.6.1 Geothermische Energie	30
1.6.2 Planetenenergie	30
1.6.3 Sonnenenergie	31
1.7 Energiewende und Klimaschutz	40
1.7.1 Szenarien für den globalen Klimawandel	41
1.7.2 Energiewende und Klimaschutz in Deutschland	49
1.7.3 Internationaler Klimaschutz	66

2	Sonnenstrahlung	71
2.1	Einleitung	71
2.2	Der Fusionsreaktor Sonne	72
2.3	Sonnenstrahlung auf der Erde	77
2.4	Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen	84
2.5	Sonnenposition und Einfallswinkel	88
2.6	Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene	92
2.6.1	Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene	92
2.6.2	Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene	93
2.6.3	Bodenreflexion	95
2.6.4	Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung	96
2.7	Berechnung von Abschattungsverlusten	99
2.7.1	Aufnahme der Umgebung	100
2.7.2	Bestimmung des direkten Abschattungsgrades	102
2.7.3	Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades	103
2.7.4	Gesamtermittlung der Abschattungen	104
2.7.5	Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen	105
2.8	Solarstrahlungsmesstechnik und Sonnensimulatoren	111
2.8.1	Messung der globalen Bestrahlungsstärke	111
2.8.2	Messung der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke	112
2.8.3	Satellitenmessungen	113
2.8.4	Künstliche Sonnen	115
3	Nicht konzentrierende Solarthermie	117
3.1	Grundlagen	117
3.2	Solarthermische Systeme	121
3.2.1	Solare Schwimmbadbeheizung	121
3.2.2	Solare Trinkwassererwärmung	123
3.2.3	Solare Heizungsunterstützung	129
3.2.4	Rein solare Heizung	130
3.2.5	Solare Nahwärmeversorgung	132
3.2.6	Solares Kühlen	133
3.3	Solarkollektoren	135
3.3.1	Speicherkollektoren	136

3.3.2	Flachkollektoren	137
3.3.3	Vakuumröhrenkollektoren	142
3.4	Kollektorabsorber	143
3.5	Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad	146
3.6	Rohrleitungen	152
3.6.1	Leitungsaufheizverluste	155
3.6.2	Zirkulationsverluste	156
3.7	Speicher	158
3.7.1	Trinkwasserspeicher	159
3.7.2	Schwimmbecken	163
3.8	Anlagenauslegung	166
3.8.1	Nutzwärmebedarf	166
3.8.2	Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad	167
3.8.3	Solare Trinkwasseranlagen	169
3.8.4	Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung	171
3.8.5	Rein solare Heizung	173
3.9	Aufwindkraftwerke	174
4	Konzentrierende Solarthermie	177
4.1	Einleitung	177
4.2	Konzentration von Solarstrahlung	178
4.3	Konzentrierende Kollektoren	181
4.3.1	Linienkollektoren	182
4.3.2	Punktkonzentratoren	191
4.4	Wärmekraftmaschinen	192
4.4.1	Carnot-Prozess	192
4.4.2	Clausius-Rankine-Prozess	193
4.4.3	Joule-Prozess	196
4.4.4	Stirling-Prozess	197
4.5	Konzentrierende solarthermische Anlagen	198
4.5.1	Parabolrinnenkraftwerke	198
4.5.2	Solarturmkraftwerke	204
4.5.3	Dish-Stirling-Anlagen	207
4.5.4	Sonnenöfen und Solarchemie	208
4.6	Stromimport	210

5	Photovoltaik	213
5.1	Einleitung	213
5.2	Funktionsweise von Solarzellen	215
5.2.1	Atommodell nach Bohr	215
5.2.2	Photoeffekt	217
5.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle	219
5.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen	227
5.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium	227
5.3.2	Solarzellen aus amorphem Silizium	234
5.3.3	Solarzellen aus anderen Materialien	235
5.3.4	Solarmodule mit kristallinen Zellen	239
5.3.5	Modultests und Qualitätskontrolle	241
5.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen	243
5.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild	243
5.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell)	245
5.4.3	Zweidiodenmodell	247
5.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm	248
5.4.5	Weitere elektrische Zellparameter	249
5.4.6	Temperaturabhängigkeit	252
5.4.7	Parameterbestimmung	256
5.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen	257
5.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen	257
5.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen	259
5.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen	265
5.5.4	Parallel- und Reihenschaltung von Halbzellen	265
5.5.5	Technische Daten von Solarmodulen	266
5.6	Solargenerator und Last	268
5.6.1	Widerstandslast	268
5.6.2	Gleichspannungswandler	269
5.6.3	Tiefsetzsteller	270
5.6.4	Hochsetzsteller	273
5.6.5	Weitere Gleichspannungswandler	274
5.6.6	MPP-Tracker	275

5.7	Akkumulatoren	278
5.7.1	Akkumulatorarten	278
5.7.2	Bleiakkumulator	279
5.7.3	Lithium-Ionen-Akkumulator	283
5.7.4	Andere Akkumulatortypen	288
5.7.5	Akkumulatorsysteme	290
5.7.6	Andere Speichermöglichkeiten	294
5.8	Wechselrichter	295
5.8.1	Wechselrichtertechnologie	295
5.8.2	Wechselrichter in der Photovoltaik	301
5.9	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme	308
5.9.1	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Speicher	308
5.9.2	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Heizung	312
5.10	Planung und Auslegung	315
5.10.1	Inselnetzsysteme	315
5.10.2	Rein netzgekoppelte Systeme	318
5.10.3	Eigenverbrauchssysteme	321
6	Windkraft	337
6.1	Einleitung	337
6.2	Dargebot von Windenergie	338
6.2.1	Entstehung des Windes	338
6.2.2	Angabe der Windstärke	340
6.2.3	Windgeschwindigkeitsverteilungen	341
6.2.4	Einfluss der Umgebung und Höhe	344
6.3	Nutzung der Windenergie	347
6.3.1	Im Wind enthaltene Leistung	347
6.3.2	Widerstandsläufer	350
6.3.3	Auftriebsläufer	352
6.4	Bauformen von Windkraftanlagen	357
6.4.1	Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse	357
6.4.2	Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse	361
6.5	Elektrische Maschinen	370
6.5.1	Elektrische Wechselstromrechnung	371
6.5.2	Drehfeld	375

6.5.3	Synchronmaschine	379
6.5.4	Asynchronmaschine	385
6.6	Elektrische Anlagenkonzepte	392
6.6.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	392
6.6.2	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	396
6.6.3	Synchrongenerator mit Umrichter und Zwischenkreis	397
6.6.4	Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren	399
6.6.5	Inselnetzanlagen	400
6.7	Netzbetrieb	401
6.7.1	Anlagenertrag	401
6.7.2	Netzanschluss	401
7	Wasserkraft	405
7.1	Einleitung	405
7.2	Dargebot der Wasserkraft	406
7.3	Wasserkraftwerke	410
7.3.1	Laufwasserkraftwerke	411
7.3.2	Speicherwässerkraftwerke	413
7.3.3	Pumpspeicherkraftwerke	414
7.3.4	Betonkugelspeicher und Lageenergiespeicher	418
7.4	Wasserturbinen	421
7.4.1	Turbinenarten	421
7.4.2	Turbinenwirkungsgrad	425
7.5	Weitere technische Anlagen zur Wasserkraftnutzung	427
7.5.1	Gezeitenkraftwerke	427
7.5.2	Meeresströmungskraftwerke	428
7.5.3	Wellenkraftwerke	429
8	Geothermie und Wärmepumpen	433
8.1	Geothermievorkommen	433
8.2	Geothermische Heizwerke	438
8.3	Geothermische Stromerzeugung	439
8.3.1	Kraftwerksprozesse	439
8.3.2	Geothermische Kraftwerke	441

8.4	Wärmepumpen	443
8.4.1	Kompressionswärmepumpen	443
8.4.2	Absorptionswärmepumpen	449
8.4.3	Adsorptionswärmepumpen	451
8.5	Auslegung von Wärmepumpen	451
8.5.1	Einsatzgebiete	451
8.5.2	Kennzahlen	452
8.5.3	Effizienter Einsatz	455
8.5.4	Auslegung eines Erdkollektors	457
9	Nutzung der Biomasse	459
9.1	Vorkommen an Biomasse	459
9.1.1	Feste Bioenergieträger	462
9.1.2	Flüssige Bioenergieträger	466
9.1.3	Gasförmige Bioenergieträger	471
9.1.4	Flächenerträge und Umweltbilanz	472
9.2	Biomasseanlagen	474
9.2.1	Biomasseheizungen	474
9.2.2	Biomassekraftwerke	477
10	Wasserstoffwirtschaft	479
10.1	Einleitung	479
10.2	Wasserstofferzeugung	480
10.3	Wasserstofftransport und Wasserstoffspeicherung	483
10.4	Wasserstoffbasierte Energieträger	487
10.4.1	Energieträger für den Transport	488
10.4.2	Methan als Speicher der Energiewende	489
10.4.3	E-Fuels	493
10.5	Brennstoffzellen	494
10.5.1	Einleitung	494
10.5.2	Brennstoffzellentypen	496
10.5.3	Wirkungsgrade und Betriebsverhalten	499
11	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	503
11.1	Einleitung	503
11.2	Energiegestehungskosten	504

11.2.1	Berechnungen ohne Kapitalverzinsung	504
11.2.2	Berechnungen mit Kapitalverzinsung	515
11.2.3	Vergütung für regenerative Energieanlagen	520
11.2.4	Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien ...	521
11.2.5	Kosten für grünen Wasserstoff	524
11.2.6	Kosten konventioneller Energiesysteme	526
11.3	Externe Kosten des Energieverbrauchs	528
11.3.1	Subventionen im Energiemarkt	528
11.3.2	Ausgaben für Forschung und Entwicklung	531
11.3.3	Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden	533
11.3.4	Sonstige externe Kosten	534
11.3.5	Internalisierung der externen Kosten	534
11.4	Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen	536
11.4.1	Unendliche Kapitalvermehrung	536
11.4.2	Die Verantwortung des Kapitals	538
12	Simulation und Downloads zum Buch	541
12.1	Allgemeines zur Simulation	541
12.2	Der Downloadbereich zum Buch	542
12.2.1	Start und Überblick	542
12.2.2	Abbildungen und Software-Links	544
12.2.3	Vermischtes	545
	Literaturverzeichnis	547
	Anhang	559
	Wichtige Konstanten	559
	Wichtige englische und US-amerikanische Einheiten	560
	Index	561