

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Energie und Klimaschutz .....</b>	<b>13</b>
1.1	Der Begriff Energie.....	13
1.2	Entwicklung des Energiebedarfs .....	18
1.2.1	Entwicklung des Weltenergiebedarfs.....	18
1.2.2	Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland.....	20
1.3	Reichweite konventioneller Energieträger .....	23
1.4	Der Treibhauseffekt .....	24
1.5	Kernenergie contra Treibhauseffekt .....	29
1.5.1	Kernspaltung .....	29
1.5.2	Kernfusion .....	32
1.6	Nutzung erneuerbarer Energien .....	33
1.6.1	Geothermische Energie .....	35
1.6.2	Planetenenergie .....	35
1.6.3	Sonnenenergie .....	36
1.6.3.1	Nutzung der direkten Sonnenenergie.....	36
1.6.3.2	Nutzung der indirekten Sonnenenergie.....	39
1.7	Künftiger Energiebedarf und Klimaschutz.....	43
1.7.1	Entwicklung des weltweiten Energiebedarfs .....	43
1.7.2	Internationaler Klimaschutz .....	45
<b>2</b>	<b>Sonnenstrahlung .....</b>	<b>49</b>
2.1	Einleitung .....	49
2.2	Der Fusionsreaktor Sonne.....	50
2.3	Sonnenstrahlung auf der Erde .....	54
2.4	Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen .....	59
2.5	Sonnenposition und Einfallswinkel .....	62
2.6	Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene .....	66
2.6.1	Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene .....	66
2.6.2	Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene.....	67
2.6.3	Bodenreflexion.....	68
2.6.4	Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung .....	69
2.7	Berechnung von Abschattungsverlusten .....	72
2.7.1	Aufnahme der Umgebung .....	72
2.7.2	Bestimmung des direkten Abschattungsgrades .....	74
2.7.3	Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades .....	75
2.7.4	Gesamtermittlung der Abschattungen.....	76
2.7.5	Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen .....	77
2.8	Solarstrahlungsmesstechnik und Sonnensimulatoren .....	80
2.8.1	Messung der globalen Bestrahlungsstärke .....	80

2.8.2	Messung der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke .....	82
2.8.3	Künstliche Sonnen .....	82
<b>3</b>	<b>Nicht konzentrierende Solarthermie.....</b>	<b>84</b>
3.1	Grundlagen .....	84
3.2	Solarthermische Systeme.....	87
3.2.1	Solare Schwimmbadbeheizung .....	87
3.2.2	Solare Trinkwassererwärmung.....	88
3.2.2.1	Schwerkraft- oder Thermosiphonanlagen .....	90
3.2.2.2	Anlagen mit Zwangsumlauf .....	91
3.2.3	Solare Heizungsunterstützung .....	93
3.2.4	Solare Nahwärmeversorgung.....	94
3.2.5	Solares Kühlen.....	94
3.3	Solarkollektoren.....	95
3.3.1	Speicherkollektoren .....	96
3.3.2	Flachkollektoren.....	98
3.3.3	Vakuumröhrenkollektoren.....	101
3.4	Kollektorabsorber .....	102
3.5	Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad.....	105
3.6	Rohrleitungen .....	110
3.6.1	Leitungsaufheizverluste .....	112
3.6.2	Zirkulationsverluste.....	113
3.7	Speicher .....	114
3.7.1	Trinkwasserspeicher.....	115
3.7.2	Schwimmbecken .....	119
3.8	Anlagenauslegung.....	121
3.8.1	Nutzwärmebedarf .....	121
3.8.2	Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad .....	123
3.8.3	Auslegung von solaren Trinkwasseranlagen .....	124
3.8.4	Auslegung von Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung .....	126
3.9	Aufwindkraftwerke .....	127
<b>4</b>	<b>Konzentrierende Solarthermie .....</b>	<b>130</b>
4.1	Einleitung .....	130
4.2	Konzentration von Solarstrahlung .....	130
4.3	Konzentrierende Kollektoren.....	133
4.3.1	Linienkollektoren.....	134
4.3.1.1	Kollektorarten und Kollektorgeometrie.....	134
4.3.1.2	Kollektornutzleistung und Kollektorwirkungsgrad.....	136
4.3.1.3	Längenausdehnung.....	140
4.3.1.4	Parabolrinnenkollektorfelder .....	140
4.3.2	Punktkonzentratoren .....	143
4.4	Wärmekraftmaschinen .....	144
4.4.1	Carnot-Prozess .....	144
4.4.2	Clausius-Rankine-Prozess .....	144
4.4.3	Joule-Prozess.....	147
4.4.4	Stirling-Prozess.....	148
4.5	Konzentrierende solarthermische Anlagen.....	148
4.5.1	Parabolrinnenkraftwerke .....	148
4.5.2	Solarturmkraftwerke .....	153
4.5.2.1	Offener volumetrischer Receiver .....	154

4.5.2.2	Druck-Receiver .....	155
4.5.3	Dish-Stirling-Anlagen .....	156
4.5.4	Sonnenöfen und Solarchemie .....	157
4.6	Stromimport .....	158
<b>5</b>	<b>Photovoltaik .....</b>	<b>161</b>
5.1	Einleitung .....	161
5.2	Funktionsweise von Solarzellen .....	163
5.2.1	Atommodell nach Bohr .....	163
5.2.2	Photoeffekt .....	164
5.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle .....	166
5.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen .....	173
5.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium .....	173
5.3.2	Solarmodule mit kristallinen Zellen .....	177
5.3.3	Solarzellen aus amorphem Silizium .....	178
5.3.4	Solarzellen aus anderen Materialien .....	179
5.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen .....	180
5.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild .....	180
5.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell) .....	181
5.4.3	Zweidiodenmodell .....	183
5.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm .....	184
5.4.5	Weitere elektrische Zellparameter .....	185
5.4.6	Temperaturabhängigkeit .....	188
5.4.7	Parameterbestimmung .....	191
5.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen .....	192
5.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen .....	192
5.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen .....	193
5.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen .....	197
5.5.4	Technische Daten von Solarmodulen .....	198
5.6	Solargenerator und Last .....	199
5.6.1	Widerstandslast .....	199
5.6.2	Gleichspannungswandler .....	200
5.6.3	Tiefsetzsteller .....	201
5.6.4	Hochsetzsteller .....	204
5.6.5	Weitere Gleichspannungswandler .....	205
5.6.6	MPP-Tracker .....	206
5.7	Akkumulatoren .....	208
5.7.1	Akkumulatorarten .....	208
5.7.2	Bleiakkumulator .....	209
5.7.3	Andere Akkumulatortypen .....	213
5.7.4	Akkumulatorsysteme .....	215
5.7.5	Andere Speichermöglichkeiten .....	218
5.8	Wechselrichter .....	219
5.8.1	Wechselrichtertechnologie .....	219
5.8.1.1	Rechteckwechselrichter .....	220
5.8.1.2	Andere Wechselrichter .....	224
5.8.2	Wechselrichter in der Photovoltaik .....	224
5.9	Planung und Auslegung .....	229
5.9.1	Inselnetzsysteme .....	229
5.9.2	Netzgekoppelte Systeme .....	231

<b>6</b>	<b>Windkraft</b>	<b>235</b>
6.1	Einleitung	235
6.2	Dargebot von Windenergie	236
6.2.1	Entstehung des Windes	236
6.2.2	Angabe der Windstärke	237
6.2.3	Windgeschwindigkeitsverteilungen	238
6.2.4	Einfluss der Umgebung und Höhe	240
6.3	Nutzung der Windenergie	243
6.3.1	Im Wind enthaltene Leistung	243
6.3.2	Widerstandsläufer	245
6.3.3	Auftriebsläufer	247
6.4	Bauformen von Windkraftanlagen	251
6.4.1	Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse	251
6.4.2	Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse	252
6.4.2.1	Anlagenaufbau	252
6.4.2.2	Rotorblätter	253
6.4.2.3	Windgeschwindigkeitsbereiche	255
6.4.2.4	Leistungsbegrenzung und Sturmabschaltung	256
6.4.2.5	Windnachführung	258
6.4.2.6	Turm, Fundament, Getriebe und Generator	259
6.4.2.7	Offshore-Windkraftanlagen	260
6.5	Elektrische Maschinen	261
6.5.1	Elektrische Wechselstromrechnung	262
6.5.2	Drehfeld	265
6.5.3	Synchronmaschine	269
6.5.3.1	Aufbau	269
6.5.3.2	Elektrische Beschreibung	270
6.5.3.3	Synchronisation	273
6.5.4	Asynchronmaschine	273
6.5.4.1	Aufbau und Betriebszustände	273
6.5.4.2	Ersatzschaltbilder und Stromortskurven	275
6.5.4.3	Leistungsbilanz	277
6.5.4.4	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien und typische Generatordaten	278
6.6	Elektrische Anlagenkonzepte	280
6.6.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	280
6.6.2	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	283
6.6.3	Synchrongenerator mit Umrichter und Zwischenkreis	284
6.6.4	Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren	286
6.6.5	Inselnetzanlagen	286
6.7	Netzbetrieb	287
6.7.1	Anlagenertrag	287
6.7.2	Netzanschluss	288
<b>7</b>	<b>Wasserkraft</b>	<b>290</b>
7.1	Einleitung	290
7.2	Dargebot der Wasserkraft	291
7.3	Wasserkraftwerke	295
7.3.1	Laufwasserkraftwerke	295
7.3.2	Speicherwasserkraftwerke	297
7.3.3	Pumpspeicherkraftwerke	298
7.4	Wasserturbinen	301

7.4.1	Turbinenarten .....	301
7.4.1.1	Kaplan-Turbine und Rohr-Turbine .....	302
7.4.1.2	Ossberger-Turbine .....	303
7.4.1.3	Francis-Turbine .....	303
7.4.1.4	Pelton-Turbine .....	304
7.4.2	Turbinenwirkungsgrad .....	304
7.5	Weitere technische Anlagen zur Wasserkraftnutzung .....	306
7.5.1	Gezeitenkraftwerke .....	306
7.5.2	Meeresströmungskraftwerke .....	307
7.5.3	Wellenkraftwerke .....	308
<b>8</b>	<b>Geothermie .....</b>	<b>310</b>
8.1	Geothermievorkommen .....	310
8.2	Geothermische Heizwerke .....	314
8.3	Geothermische Stromerzeugung .....	315
8.3.1	Kraftwerksprozesse .....	315
8.3.2	Geothermische Kraftwerke .....	317
8.4	Wärmepumpen .....	319
8.4.1	Kompressions-Wärmepumpen .....	319
8.4.2	Absorptions-Wärmepumpen .....	321
8.4.3	Adsorptions-Wärmepumpen .....	322
8.4.4	Einsatzgebiete, Planung und Ertragsberechnung .....	323
<b>9</b>	<b>Nutzung der Biomasse .....</b>	<b>327</b>
9.1	Vorkommen an Biomasse .....	327
9.1.1	Feste Bioenergieträger .....	329
9.1.2	Flüssige Bioenergieträger .....	333
9.1.2.1	Pflanzenöl .....	333
9.1.2.2	Biodiesel .....	334
9.1.2.3	Bioalkohole .....	334
9.1.2.4	Biomass-to-Liquid (BtL)-Brennstoffe .....	335
9.1.3	Gasförmige Bioenergieträger .....	336
9.1.4	Flächenerträge und Umweltbilanz .....	338
9.2	Biomasseanlagen .....	339
9.2.1	Biomasseheizungen .....	339
9.2.2	Biomassekraftwerke .....	342
<b>10</b>	<b>Brennstoffzellen und Wasserstoffherzeugung .....</b>	<b>343</b>
10.1	Wasserstoffherzeugung und -speicherung .....	343
10.2	Brennstoffzellen .....	346
10.2.1	Einleitung .....	346
10.2.2	Brennstoffzellentypen .....	347
10.2.3	Wirkungsgrade und Betriebsverhalten .....	350
<b>11</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsberechnungen .....</b>	<b>352</b>
11.1	Einleitung .....	352
11.2	Energiegestehungskosten .....	353
11.2.1	Berechnungen ohne Kapitalverzinsung .....	353
11.2.1.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung .....	354
11.2.1.2	Solarthermische Kraftwerke .....	355
11.2.1.3	Photovoltaikanlagen .....	356

11.2.1.4	Windkraftanlagen .....	356
11.2.1.5	Wasserkraftanlagen .....	357
11.2.1.6	Geothermieranlagen .....	358
11.2.1.7	Holzpelletsheizungen .....	359
11.2.2	Berechnungen mit Kapitalverzinsung .....	360
11.2.2.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung .....	363
11.2.2.2	Solarthermische Kraftwerke .....	363
11.2.2.3	Photovoltaikanlagen .....	363
11.2.2.4	Windkraftanlagen .....	364
11.2.3	Vergütung für regenerative Energieanlagen .....	364
11.2.4	Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien .....	364
11.2.5	Kosten konventioneller Energiesysteme .....	366
11.3	Externe Kosten des Energieverbrauchs .....	368
11.3.1	Subventionen im Energiemarkt .....	368
11.3.2	Ausgaben für Forschung und Entwicklung .....	370
11.3.3	Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden .....	371
11.3.4	Sonstige externe Kosten .....	372
11.3.5	Internalisierung der externen Kosten .....	372
11.4	Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen .....	373
11.4.1	Unendliche Kapitalvermehrung .....	374
11.4.2	Die Verantwortung des Kapitals .....	375
<b>12</b>	<b>Simulation und die DVD zum Buch .....</b>	<b>377</b>
12.1	Allgemeines zur Simulation .....	377
12.2	Die DVD zum Buch .....	378
12.2.1	Start und Überblick .....	378
12.2.2	Abbildungen .....	379
12.2.3	Software .....	379
12.2.4	Vermischtes .....	380
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>382</b>
	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>388</b>