



# 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 .....	25
1.5	Kernenergie contra Treibhauseffekt .....	31
1.5.1	Kernspaltung .....	31
1.5.2	Kernfusion.....	35
1.6	Nutzung erneuerbarer Energien .....	35
1.6.1	Geothermische Energie.....	37
1.6.2	Planetenergie.....	37
1.6.3	Sonnenenergie .....	38
1.6.3.1	Nutzung der direkten Sonnenenergie .....	38
1.6.3.2	Nutzung der indirekten Sonnenenergie .....	41
1.7	Energiewende und Klimaschutz .....	46
1.7.1	Szenarien für den globalen Klimawandel.....	46
1.7.2	Energiewende und Klimaschutz in Deutschland .....	52
1.7.2.1	Entwicklung der Kohlendioxidemissionen in Deutschland .....	52
1.7.2.2	Regenerative Energieversorgung in Deutschland.....	54
1.7.2.3	Umbau der Energieversorgung .....	65
1.7.3	Internationaler Klimaschutz .....	68
<b>2</b>	<b>Sonnenstrahlung.....</b>	<b>72</b>
2.1	Einleitung .....	72
2.2	Der Fusionsreaktor Sonne.....	73
2.3	Sonnenstrahlung auf der Erde .....	77
2.4	Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen .....	83
2.5	Sonnenposition und Einfallswinkel .....	86
2.6	Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene .....	90
2.6.1	Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene .....	90
2.6.2	Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene.....	91
2.6.3	Bodenreflexion.....	92
2.6.4	Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung .....	93
2.7	Berechnung von Abschattungsverlusten .....	96
2.7.1	Aufnahme der Umgebung.....	96
2.7.2	Bestimmung des direkten Abschattungsgrades .....	98
2.7.3	Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades .....	99
2.7.4	Gesamtermittlung der Abschattungen.....	100
2.7.5	Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen .....	101

2.8	Solarstrahlungsmesstechnik und Sonnensimulatoren .....	105
2.8.1	Messung der globalen Bestrahlungsstärke .....	105
2.8.2	Messung der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke .....	107
2.8.3	Satellitenmessungen.....	107
2.8.4	Künstliche Sonnen.....	110
<b>3</b>	<b>Nicht konzentrierende Solarthermie.....</b>	<b>111</b>
3.1	Grundlagen .....	111
3.2	Solarthermische Systeme.....	114
3.2.1	Solare Schwimmbadbeheizung .....	114
3.2.2	Solare Trinkwassererwärmung.....	115
3.2.2.1	Schwerkraft- oder Thermosiphonanlagen.....	117
3.2.2.2	Anlagen mit Zwangsumlauf.....	118
3.2.3	Solare Heizungsunterstützung .....	121
3.2.4	Rein solare Heizung.....	122
3.2.5	Solare Nahwärmeversorgung.....	123
3.2.6	Solares Kühlen.....	124
3.3	Solkollektoren.....	125
3.3.1	Speicherkollektoren .....	126
3.3.2	Flachkollektoren.....	128
3.3.3	Vakuumröhrenkollektoren.....	131
3.4	Kollektorabsorber .....	132
3.5	Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad .....	135
3.6	Rohrleitungen .....	140
3.6.1	Leitungsaufheizverluste .....	143
3.6.2	Zirkulationsverluste.....	143
3.7	Speicher .....	145
3.7.1	Trinkwasserspeicher .....	146
3.7.2	Schwimmbecken .....	149
3.8	Anlagenauslegung.....	152
3.8.1	Nutzwärmebedarf .....	152
3.8.2	Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad .....	153
3.8.3	Solare Trinkwasseranlagen .....	155
3.8.4	Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung.....	156
3.8.5	Rein solare Heizung.....	158
3.9	Aufwindkraftwerke .....	158
<b>4</b>	<b>Konzentrierende Solarthermie .....</b>	<b>161</b>
4.1	Einleitung .....	161
4.2	Konzentration von Solarstrahlung .....	161
4.3	Konzentrierende Kollektoren .....	164
4.3.1	Linienkollektoren .....	165
4.3.1.1	Kollektorarten und Kollektorgeometrie .....	165
4.3.1.2	Kollektornutzleistung und Kollektorwirkungsgrad .....	167
4.3.1.3	Längenausdehnung.....	171
4.3.1.4	Parabollinienkollektorfelder.....	171
4.3.2	Punktkonzentratoren.....	174
4.4	Wärmeerkraftmaschinen .....	175
4.4.1	Carnot-Prozess .....	175
4.4.2	Clausius-Rankine-Prozess.....	175
4.4.3	Joule-Prozess.....	178
4.4.4	Stirling-Prozess.....	179
4.5	Konzentrierende solarthermische Anlagen.....	179

4.5.1	Parabolrinnenkraftwerke .....	179
4.5.2	Solarturmkraftwerke .....	184
4.5.2.1	Offener volumetrischer Receiver .....	185
4.5.2.2	Druck-Receiver .....	186
4.5.3	Dish-Stirling-Anlagen .....	187
4.5.4	Sonnenöfen und Solarchemie .....	188
4.6	Stromimport .....	189
<b>5</b>	<b>Photovoltaik .....</b>	<b>192</b>
5.1	Einleitung .....	192
5.2	Funktionsweise von Solarzellen .....	194
5.2.1	Atommodell nach Bohr .....	194
5.2.2	Photoeffekt .....	195
5.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle .....	197
5.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen .....	204
5.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium .....	204
5.3.2	Solarmodule mit kristallinen Zellen .....	209
5.3.3	Solarzellen aus amorphem Silizium .....	210
5.3.4	Solarzellen aus anderen Materialien .....	211
5.3.5	Modultests und Qualitätskontrolle .....	213
5.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen .....	215
5.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild .....	215
5.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell) .....	216
5.4.3	Zweidiodenmodell .....	219
5.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm .....	219
5.4.5	Weitere elektrische Zellparameter .....	221
5.4.6	Temperaturabhängigkeit .....	223
5.4.7	Parameterbestimmung .....	226
5.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen .....	227
5.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen .....	227
5.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen .....	229
5.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen .....	234
5.5.4	Technische Daten von Solarmodulen .....	234
5.6	Solargenerator und Last .....	235
5.6.1	Widerstandslast .....	235
5.6.2	Gleichspannungswandler .....	237
5.6.3	Tiefsetzsteller .....	238
5.6.4	Hochsetzsteller .....	240
5.6.5	Weitere Gleichspannungswandler .....	241
5.6.6	MPP-Tracker .....	242
5.7	Akkumulatoren .....	244
5.7.1	Akkumulatorarten .....	244
5.7.2	Bleiakkumulator .....	245
5.7.3	Lithium-Ionen-Akkumulator .....	249
5.7.4	Andere Akkumulatortypen .....	253
5.7.5	Akkumulatorsysteme .....	254
5.7.6	Andere Speichermöglichkeiten .....	257
5.8	Wechselrichter .....	258
5.8.1	Wechselrichtertechnologie .....	258
5.8.1.1	Rechteckwechselrichter .....	259
5.8.1.2	Moderne Wechselrichtertopologien .....	262
5.8.2	Wechselrichter in der Photovoltaik .....	263
5.8.2.1	Funktionen und Aufgaben des Wechselrichters .....	263
5.8.2.2	Wechselrichterwirkungsgrade .....	265

5.8.2.3	Anlagenkonzepte .....	268
5.9	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme.....	269
5.9.1	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Speicher .....	269
5.9.2	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Heizung.....	273
5.10	Planung und Auslegung.....	275
5.10.1	Inselnetzsysteme.....	275
5.10.2	Rein netzgekoppelte Systeme .....	278
5.10.3	Eigenverbrauchssysteme .....	281
5.10.3.1	Eigenverbrauchssysteme ohne Speicher .....	281
5.10.3.2	Eigenverbrauchssysteme mit Batteriespeicher .....	285
5.10.3.3	Thermische Nutzung und NetZRückspeisung .....	292
<b>6</b>	<b>Windkraft .....</b>	<b>294</b>
6.1	Einleitung .....	294
6.2	Dargebot von Windenergie.....	295
6.2.1	Entstehung des Windes.....	295
6.2.2	Angabe der Windstärke .....	296
6.2.3	Windgeschwindigkeitsverteilungen .....	297
6.2.4	Einfluss der Umgebung und Höhe.....	299
6.3	Nutzung der Windenergie.....	302
6.3.1	Im Wind enthaltene Leistung.....	302
6.3.2	Widerstandsläufer.....	304
6.3.3	Auftriebsläufer .....	306
6.4	Bauformen von Windkraftanlagen.....	310
6.4.1	Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse .....	310
6.4.2	Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse.....	311
6.4.2.1	Anlagenaufbau .....	311
6.4.2.2	Rotorblätter .....	312
6.4.2.3	Windgeschwindigkeitsbereiche.....	314
6.4.2.4	Leistungsbegrenzung und Sturmabschaltung.....	315
6.4.2.5	Windnachführung .....	317
6.4.2.6	Turm, Fundament, Getriebe und Generator .....	318
6.4.2.7	Offshore-Windkraftanlagen .....	319
6.5	Elektrische Maschinen .....	320
6.5.1	Elektrische Wechselstromrechnung.....	321
6.5.2	Drehfeld .....	324
6.5.3	Synchronmaschine .....	328
6.5.3.1	Aufbau.....	328
6.5.3.2	Elektrische Beschreibung .....	329
6.5.3.3	Synchronisation.....	332
6.5.4	Asynchronmaschine .....	332
6.5.4.1	Aufbau und Betriebszustände .....	332
6.5.4.2	Ersatzschaltbilder und Stromortskurven .....	334
6.5.4.3	Leistungsbilanz.....	336
6.5.4.4	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien und typische Generatordaten .....	337
6.6	Elektrische Anlagenkonzepte.....	339
6.6.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung .....	339
6.6.2	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung .....	342
6.6.3	Synchrongenerator mit Umrichter und Zwischenkreis .....	343
6.6.4	Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren.....	345
6.6.5	Inselnetzanlagen .....	345
6.7	Netzbetrieb .....	346
6.7.1	Anlagenertrag .....	346
6.7.2	Netzanschluss .....	347

<b>7</b>	<b>Wasserkraft .....</b>	<b>349</b>
7.1	Einleitung .....	349
7.2	Dargebot der Wasserkraft .....	350
7.3	Wasserkraftwerke .....	354
7.3.1	Laufwasserkraftwerke .....	354
7.3.2	Speicherwasserkraftwerke .....	356
7.3.3	Pumpspeicherkraftwerke .....	357
7.3.4	Betonkugelspeicher und Lageenergiespeicher .....	361
7.4	Wasserturbinen .....	363
7.4.1	Turbinenarten .....	363
7.4.1.1	Kaplan-Turbine und Rohr-Turbine .....	364
7.4.1.2	Ossberger-Turbine .....	365
7.4.1.3	Francis-Turbine .....	365
7.4.1.4	Pelton-Turbine .....	365
7.4.2	Turbinenwirkungsgrad .....	367
7.5	Weitere technische Anlagen zur Wasserkraftnutzung .....	368
7.5.1	Gezeitenkraftwerke .....	368
7.5.2	Meeresströmungskraftwerke .....	369
7.5.3	Wellenkraftwerke .....	370
<b>8</b>	<b>Geothermie .....</b>	<b>372</b>
8.1	Geothermievorkommen .....	372
8.2	Geothermische Heizwerke .....	376
8.3	Geothermische Stromerzeugung .....	377
8.3.1	Kraftwerksprozesse .....	377
8.3.2	Geothermische Kraftwerke .....	379
8.4	Wärmepumpen .....	381
8.4.1	Kompressions-Wärmepumpen .....	381
8.4.2	Absorptions-Wärmepumpen .....	384
8.4.3	Adsorptions-Wärmepumpen .....	385
8.4.4	Einsatzgebiete, Planung und Ertragsberechnung .....	385
<b>9</b>	<b>Nutzung der Biomasse .....</b>	<b>392</b>
9.1	Vorkommen an Biomasse .....	392
9.1.1	Feste Bioenergieträger .....	394
9.1.2	Flüssige Bioenergieträger .....	398
9.1.2.1	Pflanzenöl .....	398
9.1.2.2	Biodiesel .....	399
9.1.2.3	Bioalkohole .....	399
9.1.2.4	Biomass-to-Liquid (BtL)-Brennstoffe .....	400
9.1.3	Gasförmige Bioenergieträger .....	401
9.1.4	Flächenerträge und Umweltbilanz .....	403
9.2	Biomasseanlagen .....	404
9.2.1	Biomasseheizungen .....	404
9.2.2	Biomassekraftwerke .....	407
<b>10</b>	<b>Wasserstoffwirtschaft .....</b>	<b>408</b>
10.1	Einleitung .....	408
10.2	Wasserstofferzeugung .....	409
10.3	Wasserstofftransport und Wasserstoffspeicherung .....	411
10.4	Wasserstoffbasierte Energieträger .....	414
10.4.1	Energieträger für den Transport .....	415
10.4.2	Methan als Speicher der Energiewende .....	416

10.4.3	E-Fuels.....	419
10.5	Brennstoffzellen.....	421
10.5.1	Einleitung.....	421
10.5.2	Brennstoffzellentypen.....	422
10.5.3	Wirkungsgrade und Betriebsverhalten .....	425
<b>11</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsberechnungen .....</b>	<b>427</b>
11.1	Einleitung.....	427
11.2	Energiegestehungskosten .....	428
11.2.1	Berechnungen ohne Kapitalverzinsung.....	428
11.2.1.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung.....	429
11.2.1.2	Solarthermische Kraftwerke.....	430
11.2.1.3	Photovoltaikanlagen .....	431
11.2.1.4	Windkraftanlagen.....	433
11.2.1.5	Wasserkraftanlagen .....	434
11.2.1.6	Geothermieanlagen .....	434
11.2.1.7	Holzpelletsheizungen .....	436
11.2.2	Berechnungen mit Kapitalverzinsung.....	437
11.2.2.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung.....	440
11.2.2.2	Solarthermische Kraftwerke.....	440
11.2.2.3	Photovoltaikanlagen .....	440
11.2.2.4	Windkraftanlagen.....	441
11.2.3	Vergütung für regenerative Energieanlagen .....	441
11.2.4	Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien.....	442
11.2.5	Kosten konventioneller Energiesysteme .....	444
11.3	Externe Kosten des Energieverbrauchs.....	446
11.3.1	Subventionen im Energiemarkt.....	447
11.3.2	Ausgaben für Forschung und Entwicklung .....	449
11.3.3	Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden.....	450
11.3.4	Sonstige externe Kosten .....	451
11.3.5	Internalisierung der externen Kosten .....	451
11.4	Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen .....	452
11.4.1	Unendliche Kapitalvermehrung .....	453
11.4.2	Die Verantwortung des Kapitals.....	454
<b>12</b>	<b>Simulation und Downloads zum Buch.....</b>	<b>456</b>
12.1	Allgemeines zur Simulation.....	456
12.2	Der Downloadbereich zum Buch .....	457
12.2.1	Start und Überblick .....	457
12.2.2	Abbildungen und Software-Links .....	458
12.2.3	Vermischtes .....	460
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>461</b>
	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>470</b>