



Inhaltsverzeichnis

1	Energie und Klimaschutz	13
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
2	Sonnenstrahlung	72
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
3	Nicht konzentrierende Solarthermie	111
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
4	Konzentrierende Solarthermie	161
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
5	Photovoltaik	192
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
6	Windkraft	294
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

7	Wasserkraft	349
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
8	Geothermie	372
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
9	Nutzung der Biomasse	392
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
10	Wasserstoffwirtschaft	408
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
11	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	427
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
12	Simulation und Downloads zum Buch.....	456
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
	Literaturverzeichnis	461
	Sachwortverzeichnis	470