

Volker Quaschnig

Regenerative Energiesysteme

Technologie – Berechnung – Simulation

9., aktualisierte und erweiterte Auflage

Mit 319 farbigen Bildern, 119 Tabellen und einer DVD

HANSER



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	24
1.5	Kernenergie contra Treibhauseffekt	30
	1.5.1 Kernspaltung	30
	1.5.2 Kernfusion	33
1.6	Nutzung erneuerbarer Energien	34
	1.6.1 Geothermische Energie	35
	1.6.2 Planetenenergie	36
	1.6.3 Sonnenenergie	36
	1.6.3.1 Nutzung der direkten Sonnenenergie	37
	1.6.3.2 Nutzung der indirekten Sonnenenergie	40
1.7	Energiewende und Klimaschutz	44
	1.7.1 Szenarien für den globalen Klimawandel	44
	1.7.2 Internationaler Klimaschutz	48
	1.7.3 Energiewende und Klimaschutz in Deutschland	50
	1.7.3.1 Entwicklung der Kohlendioxidemissionen in Deutschland	50
	1.7.3.2 Regenerative Energieversorgung in Deutschland	52
	1.7.3.3 Umbau der Energieversorgung	56
2	Sonnenstrahlung	58
2.1	Einleitung	58
2.2	Der Fusionsreaktor Sonne	59
2.3	Sonnenstrahlung auf der Erde	63
2.4	Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen	69
2.5	Sonnenposition und Einfallswinkel	72
2.6	Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene	76
	2.6.1 Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene	76
	2.6.2 Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene	77
	2.6.3 Bodenreflexion	78
	2.6.4 Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung	79
2.7	Berechnung von Abschattungsverlusten	82
	2.7.1 Aufnahme der Umgebung	82
	2.7.2 Bestimmung des direkten Abschattungsgrades	84
	2.7.3 Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades	85
	2.7.4 Gesamtermittlung der Abschattungen86

2.7.5	Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen	87
2.8	Solarstrahlungsmesstechnik und Sonnensimulatoren	91
2.8.1	Messung der globalen Bestrahlungsstärke	91
2.8.2	Messung der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke	93
2.8.3	Satellitenmessungen	93
2.8.4	Künstliche Sonnen	96
3	Nicht konzentrierende Solarthermie	97
3.1	Grundlagen	97
3.2	Solarthermische Systeme	100
3.2.1	Solare Schwimmbadbeheizung	100
3.2.2	Solare Trinkwassererwärmung	101
3.2.2.1	Schwerkraft- oder Thermosiphonanlagen	103
3.2.2.2	Anlagen mit Zwangsumlauf	104
3.2.3	Solare Heizungsunterstützung	107
3.2.4	Rein solare Heizung	108
3.2.5	Solare Nahwärmeversorgung	109
3.2.6	Solares Kühlen	110
3.3	Solarkollektoren	111
3.3.1	Speicherkollektoren	112
3.3.2	Flachkollektoren	114
3.3.3	Vakuumröhrenkollektoren	117
3.4	Kollektorabsorber	118
3.5	Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad	121
3.6	Rohrleitungen	126
3.6.1	Leitungsaufheizverluste	129
3.6.2	Zirkulationsverluste	129
3.7	Speicher	131
3.7.1	Trinkwasserspeicher	132
3.7.2	Schwimmbecken	135
3.8	Anlagenauslegung	138
3.8.1	Nutzwärmebedarf	138
3.8.2	Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad	139
3.8.3	Solare Trinkwasseranlagen	141
3.8.4	Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung	142
3.8.5	Rein solare Heizung	144
3.9	Aufwindkraftwerke	144
4	Konzentrierende Solarthermie	147
4.1	Einleitung	147
4.2	Konzentration von Solarstrahlung	147
4.3	Konzentrierende Kollektoren	150
4.3.1	Linienkollektoren	151
4.3.1.1	Kollektorarten und Kollektorgeometrie	151
4.3.1.2	Kollektornutzleistung und Kollektorwirkungsgrad	153
4.3.1.3	Längenausdehnung	157
4.3.1.4	Parabolrinnenkollektorfelder	157
4.3.2	Punktkonzentratoren	160
4.4	Wärme kraftmaschinen	161
4.4.1	Carnot-Prozess	161
4.4.2	Clausius-Rankine-Prozess	161
4.4.3	Joule-Prozess	164

4.4.4	Stirling-Prozess	165
4.5	Konzentrierende solarthermische Anlagen	165
4.5.1	Parabolrinnenkraftwerke	165
4.5.2	Solarturmkraftwerke	170
4.5.2.1	Offener volumetrischer Receiver	171
4.5.2.2	Druck-Receiver	172
4.5.3	Dish-Stirling-Anlagen	173
4.5.4	Sonnenöfen <i>und</i> Solarchemie	174
4.6	Stromimport	175
5	Photovoltaik	178
5.1	Einleitung	178
5.2	Funktionsweise von Solarzellen	180
5.2.1	Atommodell nach Bohr	180
5.2.2	Photoeffekt	181
5.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle	183
5.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen	190
5.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium	190
5.3.2	Solarmodule mit kristallinen Zellen	195
5.3.3	Solarzellen aus amorphem Silizium	196
5.3.4	Solarzellen aus anderen Materialien	197
5.3.5	Modultests und Qualitätskontrolle	199
5.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen	200
5.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild	200
5.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell)	201
5.4.3	Zweidiodenmodell	204
5.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm	204
5.4.5	Weitere elektrische Zellparameter	206
5.4.6	Temperaturabhängigkeit	208
5.4.7	Parameterbestimmung	211
5.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen	212
5.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen	212
5.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen	214
5.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen	218
5.5.4	Technische Daten von Solarmodulen	218
5.6	Solargenerator und Last	220
5.6.1	Widerstandslast	220
5.6.2	Gleichspannungswandler	221
5.6.3	Tiefsetzsteller	222
5.6.4	Hochsetzsteller	225
5.6.5	Weitere Gleichspannungswandler	225
5.6.6	MPP-Tracker	226
5.7	Akkumulatoren	228
5.7.1	Akkumulatorarten	228
5.7.2	Bleiakkumulator	229
5.7.3	Andere Akkumulatortypen	234
5.7.4	Akkumulatorsysteme	235
5.7.5	Andere Speichermöglichkeiten	239
5.8	Wechselrichter	239
5.8.1	Wechselrichtertechnologie	239
5.8.1.1	Rechteckwechselrichter	240

5.8.1.2	Moderne Wechselrichtertopologien	243
5.8.2	Wechselrichter in der Photovoltaik	244
5.8.2.1	Funktionen und Aufgaben des Wechselrichters	244
5.8.2.2	Wechselrichterwirkungsgrade	246
5.8.2.3	Anlagenkonzepte	249
5.9	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme	250
5.9.1	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Speicher	250
5.9.2	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Heizung	253
5.10	Planung und Auslegung	255
5.10.1	Inselnetzsysteme	255
5.10.2	Rein Netzgekoppelte Systeme	258
5.10.3	Eigenverbrauchssysteme	260
5.10.3.1	Eigenverbrauchssysteme ohne Speicher	260
5.10.3.2	Eigenverbrauchssysteme mit Batteriespeicher	265
6	Windkraft	272
6.1	Einleitung	272
6.2	Dargebot von Windenergie	273
6.2.1	Entstehung des Windes	273
6.2.2	Angabe der Windstärke	274
6.2.3	Windgeschwindigkeitsverteilungen	275
6.2.4	Einfluss der Umgebung und Höhe	277
6.3	Nutzung der Windenergie	280
6.3.1	Im Wind enthaltene Leistung	280
6.3.2	Widerstandsläufer	282
6.3.3	Auftriebsläufer	284
6.4	Bauformen von Windkraftanlagen	288
6.4.1	Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse	288
6.4.2	Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse	289
6.4.2.1	Anlagenaufbau	289
6.4.2.2	Rotorblätter	290
6.4.2.3	Windgeschwindigkeitsbereiche	292
6.4.2.4	Leistungsbegrenzung und Sturmabschaltung	293
6.4.2.5	Windnachführung	295
6.4.2.6	Turm, Fundament, Getriebe und Generator	296
6.4.2.7	Offshore-Windkraftanlagen	297
6.5	Elektrische Maschinen	298
6.5.1	Elektrische Wechselstromrechnung	299
6.5.2	Drehfeld	302
6.5.3	Synchronmaschine	306
6.5.3.1	Aufbau	306
6.5.3.2	Elektrische Beschreibung	307
6.5.3.3	Synchronisation	310
6.5.4	Asynchronmaschine	310
6.5.4.1	Aufbau und Betriebszustände	310
6.5.4.2	Ersatzschaltbilder und Stromortskurven	312
6.5.4.3	Leistungsbilanz	314
6.5.4.4	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien und typische Generatordaten	315
6.6	Elektrische Anlagenkonzepte	317
6.6.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	317
6.6.2	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	320

6.6.3	Synchrongenerator mit Umrichter und Zwischenkreis	321
6.6.4	Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren	323
6.6.5	Inselnetzanlagen	323
6.7	Netzbetrieb	324
6.7.1	Anlagenertrag	324
6.7.2	Netzanschluss	325
7	Wasserkraft	327
7.1	Einleitung	327
7.2	Dargebot der Wasserkraft	328
7.3	Wasserkraftwerke	332
7.3.1	Laufwasserkraftwerke	332
7.3.2	Speicherwasserkraftwerke	334
7.3.3	Pumpspeicherkraftwerke	335
7.4	Wasserturbinen	338
7.4.1	Turbinenarten	338
7.4.1.1	Kaplan-Turbine und Rohr-Turbine	339
7.4.1.2	Ossberger-Turbine	340
7.4.1.3	Francis-Turbine	340
7.4.1.4	Pelton-Turbine	341
7.4.2	Turbinenwirkungsgrad	341
7.5	Weitere technische Anlagen zur Wasserkraftnutzung	343
7.5.1	Gezeitenkraftwerke	343
7.5.2	Meeresströmungskraftwerke	344
7.5.3	Wellenkraftwerke	345
8	Geothermie	347
8.1	Geothermievorkommen	347
8.2	Geothermische Heizwerke	351
8.3	Geothermische Stromerzeugung	352
8.3.1	Kraftwerksprozesse	352
8.3.2	Geothermische Kraftwerke	354
8.4	Wärmepumpen	356
8.4.1	Kompressions-Wärmepumpen	356
8.4.2	Absorptions-Wärmepumpen	358
8.4.3	Adsorptions-Wärmepumpen	359
8.4.4	Einsatzgebiete, Planung und Ertragsberechnung	360
9	Nutzung der Biomasse	365
9.1	Vorkommen an Biomasse	365
9.1.1	Feste Bioenergieträger	367
9.1.2	Flüssige Bioenergieträger	371
9.1.2.1	Pflanzenöl	371
9.1.2.2	Biodiesel	372
9.1.2.3	Bioalkohole	372
9.1.2.4	Biomass-to-Liquid (BtL)-Brennstoffe	373
9.1.3	Gasförmige Bioenergieträger	374
9.1.4	Flächenerträge und Umweltbilanz	376
9.2	Biomasseanlagen	377
9.2.1	Biomasseheizungen	377
9.2.2	Biomassekraftwerke	380

10	Wasserstofferzeugung, Brennstoffzellen und Methanisierung	381
10.1	Wasserstofferzeugung und -speicherung	381
10.2	Brennstoffzellen	384
10.2.1	Einleitung	384
10.2.2	Brennstoffzellentypen	385
10.2.3	Wirkungsgrade und Betriebsverhalten	388
10.3	Methanisierung und Untertagespeicherung	390
11	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	394
11.1	Einleitung	394
11.2	Energiegestehungskosten	395
11.2.1	Berechnungen ohne Kapitalverzinsung	395
11.2.1.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	396
11.2.1.2	Solarthermische Kraftwerke	397
11.2.1.3	Photovoltaikanlagen	398
11.2.1.4	Windkraftanlagen	398
11.2.1.5	Wasserkraftanlagen	399
11.2.1.6	Geothermieanlagen	400
11.2.1.7	Holzpelletsheizungen	401
11.2.2	Berechnungen mit Kapitalverzinsung	402
11.2.2.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	405
11.2.2.2	Solarthermische Kraftwerke	405
11.2.2.3	Photovoltaikanlagen	405
11.2.2.4	Windkraftanlagen	406
11.2.3	Vergütung für regenerative Energieanlagen	406
11.2.4	Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien	406
11.2.5	Kosten konventioneller Energiesysteme	409
11.3	Externe Kosten des Energieverbrauchs	411
11.3.1	Subventionen im Energiemarkt	412
11.3.2	Ausgaben für Forschung und Entwicklung	414
11.3.3	Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden	415
11.3.4	Sonstige externe Kosten	416
11.3.5	Internalisierung der externen Kosten	416
11.4	Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen	418
11.4.1	Unendliche Kapitalvermehrung	418
11.4.2	Die Verantwortung des Kapitals	419
12	Simulation und die DVD zum Buch	421
12.1	Allgemeines zur Simulation	421
12.2	Die DVD zum Buch	422
12.2.1	Start und Überblick	422
12.2.2	Abbildungen	423
12.2.3	Software	423
12.2.4	Vermischtes	424
	Literaturverzeichnis	426
	Sachwortverzeichnis	434