

Volker Quaschnig

Regenerative Energiesysteme

Technologie – Berechnung – Simulation

8., aktualisierte und erweiterte Auflage

mit 296 farbigen Bildern, 117 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	Planetenergie	36
1.6.3	Sonnenenergie	36
1.6.3.1	Nutzung der direkten Sonnenenergie	37
1.6.3.2	Nutzung der indirekten Sonnenenergie	39
1.7	Künftiger Energiebedarf, Energiewende und Klimaschutz	43
1.7.1	Entwicklung des weltweiten Energiebedarfs	43
1.7.2	Internationaler Klimaschutz	46
1.7.3	Energiewende und Klimaschutz in Deutschland	48
1.7.3.1	Entwicklung der Kohlendioxidemissionen in Deutschland	48
1.7.3.2	Regenerative Energieversorgung in Deutschland	48
1.7.3.3	Umbau der Energieversorgung	53
2	Sonnenstrahlung	55
2.1	Einleitung	55
2.2	Der Fusionsreaktor Sonne	56
2.3	Sonnenstrahlung auf der Erde	60
2.4	Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen	65
2.5	Sonnenposition und Einfallswinkel	68
2.6	Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene	72
2.6.1	Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene	72
2.6.2	Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene	73
2.6.3	Bodenreflexion	74
2.6.4	Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung	75
2.7	Berechnung von Abschattungsverlusten	78
2.7.1	Aufnahme der Umgebung	78
2.7.2	Bestimmung des direkten Abschattungsgrades	80
2.7.3	Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades	81

2.7.4	Gesamtermittlung der Abschattungen	82
2.7.5	Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen	83
2.8	Solarstrahlungsmesstechnik und Sonnensimulatoren	86
2.8.1	Messung der globalen Bestrahlungsstärke	86
2.8.2	Messung der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke	88
2.8.3	Künstliche Sonnen	88
3	Nicht konzentrierende Solarthermie	90
3.1	Grundlagen	90
3.2	Solarthermische Systeme	93
3.2.1	Solare Schwimmbadbeheizung	93
3.2.2	Solare Trinkwassererwärmung	94
3.2.2.1	Schwerkraft- oder Thermosiphonanlagen	96
3.2.2.2	Anlagen mit Zwangsumlauf	97
3.2.3	Solare Heizungsunterstützung	99
3.2.4	Rein solare Heizung	100
3.2.5	Solare Nahwärmeversorgung	101
3.2.6	Solares Kühlen	102
3.3	Solarkollektoren	103
3.3.1	Speicherkollektoren	104
3.3.2	Flachkollektoren	106
3.3.3	Vakuumröhrenkollektoren	109
3.4	Kollektorabsorber	110
3.5	Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad	113
3.6	Rohrleitungen	118
3.6.1	Leitungsaufheizverluste	121
3.6.2	Zirkulationsverluste	121
3.7	Speicher	123
3.7.1	Trinkwasserspeicher124
3.7.2	Schwimmbecken	127
3.8	Anlagenauslegung	130
3.8.1	Nutzwärmebedarf	130
3.8.2	Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad	131
3.8.3	Solare Trinkwasseranlagen	133
3.8.4	Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung	134
3.8.5	Rein solare Heizung	136
3.9	Aufwindkraftwerke	136
4	Konzentrierende Solarthermie	139
4.1	Einleitung	139
4.2	Konzentration von Solarstrahlung	139
4.3	Konzentrierende Kollektoren	142
4.3.1	Linienkollektoren	143
4.3.1.1	Kollektorarten und Kollektorgeometrie	143
4.3.1.2	Kollektornutzleistung und Kollektorwirkungsgrad	145
4.3.1.3	Längenausdehnung	149
4.3.1.4	Parabolrinnenkollektorfelder	149
4.3.2	Punktkonzentratoren	152
4.4	Wärmekeftmaschinen	153
4.4.1	Carnot-Prozess	153
4.4.2	Clausius-Rankine-Prozess	153

4.4.3	Joule-Prozess	156
4.4.4	Stirling-Prozess	157
4.5	Konzentrierende solarthermische Anlagen	157
4.5.1	Parabolrinnenkraftwerke	157
4.5.2	Solarturmkraftwerke	162
4.5.2.1	Offener volumetrischer Receiver	163
4.5.2.2	Druck-Receiver	164
4.5.3	Dish-Stirling-Anlagen	165
4.5.4	Sonnenöfen und Solarchemie	166
4.6	Stromimport	167
5	Photovoltaik	170
5.1	Einleitung	170
5.2	Funktionsweise von Solarzellen	172
5.2.1	Atommodell nach Bohr	172
5.2.2	Photoeffekt	173
5.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle	175
5.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen	182
5.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium	182
5.3.2	Solarmodule mit kristallinen Zellen	186
5.3.3	Solarzellen aus amorphem Silizium	187
5.3.4	Solarzellen aus anderen Materialien	188
5.3.5	Modultests und Qualitätskontrolle	189
5.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen	190
5.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild	190
5.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell)	191
5.4.3	Zweidiodenmodell	194
5.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm	194
5.4.5	Weitere elektrische Zellparameter	196
5.4.6	Temperaturabhängigkeit	198
5.4.7	Parameterbestimmung	201
5.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen	202
5.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen	202
5.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen	204
5.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen	208
5.5.4	Technische Daten von Solarmodulen	208
5.6	Solargenerator und Last	210
5.6.1	Widerstandslast	210
5.6.2	Gleichspannungswandler	211
5.6.3	Tiefsetzsteller	212
5.6.4	Hochsetzsteller	215
5.6.5	Weitere Gleichspannungswandler	215
5.6.6	MPP-Tracker	216
5.7	Akkumulatoren	218
5.7.1	Akkumulatorarten	218
5.7.2	Bleiakkumulator	219
5.7.3	Andere Akkumulatortypen	224
5.7.4	Akkumulatorsysteme	225
5.7.5	Andere Speichermöglichkeiten	229
5.8	Wechselrichter	229
5.8.1	Wechselrichtertechnologie	229

5.8.1.1	Rechteckwechselrichter	230
5.8.1.2	Moderne Wechselrichtertopologien	233
5.8.2	Wechselrichter in der Photovoltaik	234
5.8.2.1	Funktionen und Aufgaben des Wechselrichters	234
5.8.2.2	Wechselrichterwirkungsgrade	236
5.8.2.3	Anlagenkonzepte	239
5.9	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme	240
5.10	Planung und Auslegung	243
5.10.1	Inselnetzsysteme	243
5.10.2	Netzgekoppelte Systeme	246
5.10.3	Eigenverbrauchssysteme	249
6	Windkraft	255
6.1	Einleitung	255
6.2	Dargebot von Windenergie	256
6.2.1	Entstehung des Windes	256
6.2.2	Angabe der Windstärke	257
6.2.3	Windgeschwindigkeitsverteilungen	258
6.2.4	Einfluss der Umgebung und Höhe	260
6.3	Nutzung der Windenergie	263
6.3.1	Im Wind enthaltene Leistung	263
6.3.2	Widerstandsläufer	265
6.3.3	Auftriebsläufer	267
6.4	Bauformen von Windkraftanlagen	271
6.4.1	Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse	271
6.4.2	Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse	272
6.4.2.1	Anlagenaufbau	272
6.4.2.2	Rotorblätter	273
6.4.2.3	Windgeschwindigkeitsbereiche	275
6.4.2.4	Leistungsbegrenzung und Sturmabschaltung	276
6.4.2.5	Windnachführung	278
6.4.2.6	Turm, Fundament, Getriebe und Generator	279
6.4.2.7	Offshore-Windkraftanlagen	280
6.5	Elektrische Maschinen	281
6.5.1	Elektrische Wechselstromrechnung	282
6.5.2	Drehfeld	285
6.5.3	Synchronmaschine	289
6.5.3.1	Aufbau	289
6.5.3.2	Elektrische Beschreibung	290
6.5.3.3	Synchronisation	293
6.5.4	Asynchronmaschine	293
6.5.4.1	Aufbau und Betriebszustände	293
6.5.4.2	Ersatzschaltbilder und Stromortskurven	295
6.5.4.3	Leistungsbilanz	297
6.5.4.4	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien und typische Generatordaten	298
6.6	Elektrische Anlagenkonzepte	300
6.6.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	300
6.6.2	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	303
6.6.3	Synchrongenerator mit Umrichter und Zwischenkreis	304
6.6.4	Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren	306
6.6.5	Inselnetzanlagen	306

6.7	Netzbetrieb	307
6.7.1	Anlagenertrag	307
6.7.2	Netzanschluss	308
7	Wasserkraft	310
7.1	Einleitung	310
7.2	Dargebot der Wasserkraft	311
7.3	Wasserkraftwerke	315
7.3.1	Laufwasserkraftwerke	315
7.3.2	Speicherwasserkraftwerke	317
7.3.3	Pumpspeicherkraftwerke	318
7.4	Wasserturbinen	321
7.4.1	Turbinenarten	321
7.4.1.1	Kaplan-Turbine und Rohr-Turbine	322
7.4.1.2	Ossberger-Turbine	323
7.4.1.3	Francis-Turbine	323
7.4.1.4	Pelton-Turbine	324
7.4.2	Turbinenwirkungsgrad	324
7.5	Weitere technische Anlagen zur Wasserkraftnutzung	326
7.5.1	Gezeitenkraftwerke	326
7.5.2	Meeresströmungskraftwerke	327
7.5.3	Wellenkraftwerke	328
8	Geothermie	330
8.1	Geothermievorkommen	330
8.2	Geothermische Heizwerke	334
8.3	Geothermische Stromerzeugung	335
8.3.1	Kraftwerksprozesse	335
8.3.2	Geothermische Kraftwerke	337
8.4	Wärmepumpen	339
8.4.1	Kompressions-Wärmepumpen	339
8.4.2	Absorptions-Wärmepumpen	341
8.4.3	Adsorptions-Wärmepumpen	342
8.4.4	Einsatzgebiete, Planung und Ertragsberechnung	343
9	Nutzung der Biomasse	347
9.1	Vorkommen an Biomasse	347
9.1.1	Feste Bioenergieträger	349
9.1.2	Flüssige Bioenergieträger	353
9.1.2.1	Pflanzenöl	353
9.1.2.2	Biodiesel	354
9.1.2.3	Bioalkohole	354
9.1.2.4	Biomass-to-Liquid (BtL)-Brennstoffe	355
9.1.3	Gasförmige Bioenergieträger	356
9.1.4	Flächenerträge und Umweltbilanz	358
9.2	Biomasseanlagen	359
9.2.1	Biomasseheizungen	359
9.2.2	Biomassekraftwerke	362
10	Wasserstofferzeugung, Brennstoffzellen und Methanisierung	363
10.1	Wasserstofferzeugung und -speicherung	363

10.2	Brennstoffzellen	366
	10.2.1 Einleitung	366
	10.2.2 Brennstoffzellentypen	367
	10.2.3 Wirkungsgrade und Betriebsverhalten	370
10.3	Methanisierung und Untertagespeicherung	372
11	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	375
11.1	Einleitung	375
11.2	Energiegestehungskosten	376
	11.2.1 Berechnungen ohne Kapitalverzinsung	376
	11.2.1.1 Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	377
	11.2.1.2 Solarthermische Kraftwerke	378
	11.2.1.3 Photovoltaikanlagen	379
	11.2.1.4 Windkraftanlagen	379
	11.2.1.5 Wasserkraftanlagen	380
	11.2.1.6 Geothermieanlagen	...381
	11.2.1.7 Holzpelletsheizungen	382
	11.2.2 Berechnungen mit Kapitalverzinsung	383
	11.2.2.1 Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	386
	11.2.2.2 Solarthermische Kraftwerke	386
	11.2.2.3 Photovoltaikanlagen	386
	11.2.2.4 Windkraftanlagen	387
	11.2.3 Vergütung für regenerative Energieanlagen	387
	11.2.4 Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien	387
	11.2.5 Kosten konventioneller Energiesysteme	390
11.3	Externe Kosten des Energieverbrauchs	392
	11.3.1 Subventionen im Energiemarkt	392
	11.3.2 Ausgaben für Forschung und Entwicklung	394
	11.3.3 Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden	395
	11.3.4 Sonstige externe Kosten	396
	11.3.5 Internalisierung der externen Kosten	397
11.4	Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen	398
	11.4.1 Unendliche Kapitalvermehrung	398
	11.4.2 Die Verantwortung des Kapitals	399
12	Simulation und die DVD zum Buch	401
12.1	Allgemeines zur Simulation	401
12.2	Die DVD zum Buch	402
	12.2.1 Start und Überblick	402
	12.2.2 Abbildungen	403
	12.2.3 Software	403
	12.2.4 Vermischtes	404
	Literaturverzeichnis	406
	Sachwortverzeichnis	413