

Volker Quaschnig

Regenerative Energiesysteme

Technologie – Berechnung – Klimaschutz

10., aktualisierte und erweiterte Auflage

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	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	Planetenenergie	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	Internationaler Klimaschutz	51
1.7.3	Energiewende und Klimaschutz in Deutschland	53
1.7.3.1	Entwicklung der Kohlendioxidemissionen in Deutschland	53
1.7.3.2	Regenerative Energieversorgung in Deutschland	55
1.7.3.3	Umbau der Energieversorgung	64
2	Sonnenstrahlung	68
2.1	Einleitung	68
2.2	Der Fusionsreaktor Sonne	69
2.3	Sonnenstrahlung auf der Erde	73
2.4	Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen	79
2.5	Sonnenposition und Einfallswinkel	82
2.6	Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene	86
2.6.1	Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene	86
2.6.2	Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene	87
2.6.3	Bodenreflexion	88
2.6.4	Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung	89
2.7	Berechnung von Abschattungsverlusten	92
2.7.1	Aufnahme der Umgebung	92
2.7.2	Bestimmung des direkten Abschattungsgrades	94
2.7.3	Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades	95
2.7.4	Gesamtermittlung der Abschattungen	96
2.7.5	Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen	97

2.8	Solarstrahlungsmesstechnik und Sonnensimulatoren	101
2.8.1	Messung der globalen Bestrahlungsstärke	101
2.8.2	Messung der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke	103
2.8.3	Satellitenmessungen	103
2.8.4	Künstliche Sonnen	106
3	Nicht konzentrierende Solarthermie	107
3.1	Grundlagen	107
3.2	Solarthermische Systeme	110
3.2.1	Solare Schwimmbadbeheizung	110
3.2.2	Solare Trinkwassererwärmung	111
3.2.2.1	Schwerkraft- oder Thermosiphonanlagen	113
3.2.2.2	Anlagen mit Zwangsumlauf	114
3.2.3	Solare Heizungsunterstützung	117
3.2.4	Rein solare Heizung	118
3.2.5	Solare Nahwärmeversorgung	119
3.2.6	Solares Kühlen	120
3.3	Solarkollektoren	121
3.3.1	Speicherkollektoren	122
3.3.2	Flachkollektoren	124
3.3.3	Vakuumröhrenkollektoren	127
3.4	Kollektorabsorber	128
3.5	Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad	131
3.6	Rohrleitungen	136
3.6.1	Leitungsaufheizverluste	139
3.6.2	Zirkulationsverluste	139
3.7	Speicher	141
3.7.1	Trinkwasserspeicher	142
3.7.2	Schwimmbecken	145
3.8	Anlagenauslegung	148
3.8.1	Nutzwärmebedarf	148
3.8.2	Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad	149
3.8.3	Solare Trinkwasseranlagen	151
3.8.4	Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung	152
3.8.5	Rein solare Heizung	154
3.9	Aufwindkraftwerke	154
4	Konzentrierende Solarthermie	157
4.1	Einleitung	157
4.2	Konzentration von Solarstrahlung	157
4.3	Konzentrierende Kollektoren	160
4.3.1	Linienkollektoren	161
4.3.1.1	Kollektorarten und Kollektorgeometrie	161
4.3.1.2	Kollektornutzleistung und Kollektorwirkungsgrad	163
4.3.1.3	Längenausdehnung	167
4.3.1.4	Parabolrinnenkollektorfelder	167
4.3.2	Punktkonzentratoren	170
4.4	Wärme kraftmaschinen	171
4.4.1	Carnot-Prozess	171
4.4.2	Clausius-Rankine-Prozess	171
4.4.3	Joule-Prozess	174
4.4.4	Stirling-Prozess	175

4.5	Konzentrierende solarthermische Anlagen	175
4.5.1	Parabolrinnenkraftwerke	175
4.5.2	Solarturmkraftwerke	180
4.5.2.1	Offener volumetrischer Receiver	181
4.5.2.2	Druck-Receiver	182
4.5.3	Dish-Stirling-Anlagen	183
4.5.4	Sonnenöfen und Solarchemie	184
4.6	Stromimport	185
5	Photovoltaik	188
5.1	Einleitung	188
5.2	Funktionsweise von Solarzellen	190
5.2.1	Atommodell nach Bohr	190
5.2.2	Photoeffekt	191
5.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle	193
5.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen	200
5.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium	200
5.3.2	Solarmodule mit kristallinen Zellen	205
5.3.3	Solarzellen aus amorphem Silizium	206
5.3.4	Solarzellen aus anderen Materialien	207
5.3.5	Modultests und Qualitätskontrolle	209
5.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen	211
5.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild	211
5.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell)	212
5.4.3	Zweidiodenmodell	215
5.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm	215
5.4.5	Weitere elektrische Zellparameter	217
5.4.6	Temperaturabhängigkeit	219
5.4.7	Parameterbestimmung	222
5.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen	223
5.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen	223
5.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen	225
5.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen	230
5.5.4	Technische Daten von Solarmodulen	230
5.6	Solargenerator und Last	231
5.6.1	Widerstandslast	231
5.6.2	Gleichspannungswandler	233
5.6.3	Tiefsetzsteller	234
5.6.4	Hochsetzsteller	236
5.6.5	Weitere Gleichspannungswandler	237
5.6.6	MPP-Tracker	238
5.7	Akkumulatoren	240
5.7.1	Akkumulatorarten	240
5.7.2	Bleiakkumulator	241
5.7.3	Lithium-Ionen-Akkumulator	245
5.7.4	Andere Akkumulatortypen	249
5.7.5	Akkumulatorsysteme	250
5.7.6	Andere Speichermöglichkeiten	253
5.8	Wechselrichter	254
5.8.1	Wechselrichtertechnologie	254
5.8.1.1	Rechteckwechselrichter	255
5.8.1.2	Moderne Wechselrichtertopologien	258

5.8.2	Wechselrichter in der Photovoltaik	259
5.8.2.1	Funktionen und Aufgaben des Wechselrichters	259
5.8.2.2	Wechselrichterwirkungsgrade	261
5.8.2.3	Anlagenkonzepte	264
5.9	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme	265
5.9.1	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Speicher	265
5.9.2	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Heizung	269
5.10	Planung und Auslegung	271
5.10.1	Inselnetzsysteme	271
5.10.2	Rein netzgekoppelte Systeme	274
5.10.3	Eigenverbrauchssysteme	277
5.10.3.1	Eigenverbrauchssysteme ohne Speicher	277
5.10.3.2	Eigenverbrauchssysteme mit Batteriespeicher	281
5.10.3.3	Thermische Nutzung und Netzzurückspeisung	288
6	Windkraft	290
6.1	Einleitung	290
6.2	Dargebot von Windenergie	291
6.2.1	Entstehung des Windes	291
6.2.2	Angabe der Windstärke	292
6.2.3	Windgeschwindigkeitsverteilungen	293
6.2.4	Einfluss der Umgebung und Höhe	295
6.3	Nutzung der Windenergie	298
6.3.1	Im Wind enthaltene Leistung	298
6.3.2	Widerstandsläufer	300
6.3.3	Auftriebsläufer	302
6.4	Bauformen von Windkraftanlagen	306
6.4.1	Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse	306
6.4.2	Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse	307
6.4.2.1	Anlagenaufbau	307
6.4.2.2	Rotorblätter	308
6.4.2.3	Windgeschwindigkeitsbereiche	310
6.4.2.4	Leistungsbegrenzung und Sturmabschaltung	311
6.4.2.5	Windnachführung	313
6.4.2.6	Turm, Fundament, Getriebe und Generator	314
6.4.2.7	Offshore-Windkraftanlagen	315
6.5	Elektrische Maschinen	316
6.5.1	Elektrische Wechselstromrechnung	317
6.5.2	Drehfeld	320
6.5.3	Synchronmaschine	324
6.5.3.1	Aufbau	324
6.5.3.2	Elektrische Beschreibung	325
6.5.3.3	Synchronisation	328
6.5.4	Asynchronmaschine	328
6.5.4.1	Aufbau und Betriebszustände	328
6.5.4.2	Ersatzschaltbilder und Stromortskurven	330
6.5.4.3	Leistungsbilanz	332
6.5.4.4	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien und typische Generatordaten	333
6.6	Elektrische Anlagenkonzepte	335
6.6.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	335
6.6.2	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	338
6.6.3	Synchrongenerator mit Umrichter und Zwischenkreis	339

6.6.4	Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren	341
6.6.5	Inselnetzanlagen	341
6.7	Netzbetrieb	342
6.7.1	Anlagenertrag	342
6.7.2	Netzanschluss	343
7	Wasserkraft	345
7.1	Einleitung	345
7.2	Dargebot der Wasserkraft	346
7.3	Wasserkraftwerke	350
7.3.1	Laufwasserkraftwerke	350
7.3.2	Speicherwasserkraftwerke	352
7.3.3	Pumpspeicherkraftwerke	353
7.3.4	Betonkugelspeicher und Lageenergiespeicher	356
7.4	Wasserturbinen	358
7.4.1	Turbinenarten	358
7.4.1.1	Kaplan-Turbine und Rohr-Turbine	359
7.4.1.2	Ossberger-Turbine	361
7.4.1.3	Francis-Turbine	361
7.4.1.4	Pelton-Turbine	362
7.4.2	Turbinenwirkungsgrad	362
7.5	Weitere technische Anlagen zur Wasserkraftnutzung	364
7.5.1	Gezeitenkraftwerke	364
7.5.2	Meeresströmungskraftwerke	365
7.5.3	Wellenkraftwerke	366
8	Geothermie	368
8.1	Geothermievorkommen	368
8.2	Geothermische Heizwerke	372
8.3	Geothermische Stromerzeugung	373
8.3.1	Kraftwerksprozesse	373
8.3.2	Geothermische Kraftwerke	375
8.4	Wärmepumpen	377
8.4.1	Kompressions-Wärmepumpen	377
8.4.2	Absorptions-Wärmepumpen	379
8.4.3	Adsorptions-Wärmepumpen	380
8.4.4	Einsatzgebiete, Planung und Ertragsberechnung	381
9	Nutzung der Biomasse	386
9.1	Vorkommen an Biomasse	386
9.1.1	Feste Bioenergieträger	388
9.1.2	Flüssige Bioenergieträger	392
9.1.2.1	Pflanzenöl	392
9.1.2.2	Biodiesel	393
9.1.2.3	Bioalkohole	393
9.1.2.4	Biomass-to-Liquid (BtL)-Brennstoffe	394
9.1.3	Gasförmige Bioenergieträger	395
9.1.4	Flächenerträge und Umweltbilanz	397
9.2	Biomasseanlagen	398
9.2.1	Biomasseheizungen	398
9.2.2	Biomassekraftwerke	401

10	Wasserstofferzeugung, Brennstoffzellen und Methanisierung	402
10.1	Wasserstofferzeugung und -speicherung	402
10.2	Brennstoffzellen	405
	10.2.1 Einleitung	405
	10.2.2 Brennstoffzellentypen	406
	10.2.3 Wirkungsgrade und Betriebsverhalten	409
10.3	Methanisierung und Untertagespeicherung	411
11	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	415
11.1	Einleitung	415
11.2	Energiegestehungskosten	416
	11.2.1 Berechnungen ohne Kapitalverzinsung	416
	11.2.1.1 Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	417
	11.2.1.2 Solarthermische Kraftwerke	418
	11.2.1.3 Photovoltaikanlagen	419
	11.2.1.4 Windkraftanlagen	421
	11.2.1.5 Wasserkraftanlagen	422
	11.2.1.6 Geothermieanlagen	422
	11.2.1.7 Holzpelletsheizungen	424
	11.2.2 Berechnungen mit Kapitalverzinsung	425
	11.2.2.1 Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	428
	11.2.2.2 Solarthermische Kraftwerke	428
	11.2.2.3 Photovoltaikanlagen	428
	11.2.2.4 Windkraftanlagen	429
	11.2.3 Vergütung für regenerative Energieanlagen	429
	11.2.4 Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien	430
	11.2.5 Kosten konventioneller Energiesysteme	432
11.3	Externe Kosten des Energieverbrauchs	434
	11.3.1 Subventionen im Energiemarkt	435
	11.3.2 Ausgaben für Forschung und Entwicklung	437
	11.3.3 Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden	438
	11.3.4 Sonstige externe Kosten	439
	11.3.5 Internalisierung der externen Kosten	439
11.4	Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen	440
	11.4.1 Unendliche Kapitalvermehrung	441
	11.4.2 Die Verantwortung des Kapitals	442
12	Simulation und Downloads zum Buch	444
12.1	Allgemeines zur Simulation	444
12.2	Der Downloadbereich zum Buch	445
	12.2.1 Start und Überblick	445
	12.2.2 Abbildungen und Software-Links	446
	12.2.3 Vermischtes	448
	Literaturverzeichnis	449
	Sachwortverzeichnis	458