

# Regenerative Energiesysteme

Technologie - Berechnung - Simulation

von Volker Quaschning

2. Auflage

mit 156 Bildern, 79 Tabellen und einer CD-ROM



Carl Hanser Verlag München Wien

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Energie, Klimaschutz und erneuerbare Energien.....</b>	<b>1</b>
1.1 Der Begriff Energie.....	1
1.2 Entwicklung des Energiebedarfs.....	6
1.2.1 Entwicklung des Weltenergiebedarfs.....	6
1.2.2 Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschi and.....	8
1.3 Reichweite konventioneller Energieträger.....	11
1.4 Der Treibhauseffekt.....	12
1.5 Kernenergie contra Treibhauseffekt.....	18
1.5.1 Kernspaltung.....	18
1.5.2 Kernfusion.....	21
1.6 Erneuerbare Energien.....	22
1.6.1 Geothermische Energie.....	23
1.6.2 Planetenenergie.....	24
1.6.3 Sonnenenergie.....	24
1.7 Strukturen einer zukünftigen Energieversorgung.....	36
1.7.1 Entwicklung des weltweiten Energiebedarfs.....	36
1.7.2 Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland.....	38
<b>2 Sonnenstrahlung.....</b>	<b>41</b>
2.1 Einleitung.....	41
2.2 Der Fusionsreaktor Sonne.....	41
2.3 Sonnenstrahlung auf der Erde.....	45
2.4 Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen.....	48
2.5 Berechnung des Sonnenstandes.....	51
2.6 Berechnung des Sonneneinfallswinkels.....	54
2.7 Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene.....	55
2.7.1 Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene.....	55
2.7.2 Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene.....	56
2.7.3 Bodenreflexion.....	57
2.7.4 Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung.....	58
2.8 Berechnung von Abschattungsverlusten.....	61
2.8.1 Aufnahme der Umgebung.....	61
2.8.2 Bestimmung des direkten Abschattungsgrades.....	63
2.8.3 Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades.....	64
2.8.4 Gesamtermittlung der Abschattungen.....	66
2.8.5 Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen.....	66
<b>3 Solarthermische Wassererwärmung.....</b>	<b>71</b>
3.1 Grundlagen.....	71
3.2 Solarthermische Systeme zur Wassererwärmung.....	74
3.2.1 Solare Schwimmbadbeheizung.....	74
3.2.2 Solare Brauchwassererwärmung.....	76
3.3 Solarkollektoren.....	79

3.3.1	Speicherkollektoren.....	80
3.3.2	Flachkollektoren.....	82
3.3.3	Vakuümröhrenkollektor.....	88
3.3.4	Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad.....	89
3.4	Rohrleitungen.....	91
3.4.1	Leitungsaufheizverluste.....	94
3.4.2	Zirkulationsverluste.....	95
3.5	Speicher.....	97
3.5.1	Brauchwasserspeicher.....	98
3.5.2	Schwimmbecken.....	102
3.6	Nutzwärmebedarf und Deckungsrate bei Brauchwasseranlagen.....	105
<b>4</b>	<b>Photovoltaik.....</b>	<b>109</b>
4.1	Einleitung.....	109
4.2	Funktionsweise von Solarzellen.....	111
4.2.1	Das Atommodell nach Bohr.....	111
4.2.2	Der Photoeffekt.....	112
4.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle.....	114
4.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen.....	121
4.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium.....	121
4.3.2	Solarmodule mit kristallinen Zellen.....	123
4.3.3	Dünnschichtzellen.....	123
4.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen.....	125
4.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild.....	125
4.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell).....	126
4.4.3	Zweidiodenmodell.....	128
4.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm.....	129
4.4.5	Weitere elektrische Zellparameter.....	130
4.4.6	Temperaturabhängigkeit.....	133
4.4.7	Parameterbestimmung.....	135
4.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen.....	136
4.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen.....	136
4.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen.....	137
4.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen.....	140
4.5.4	Technische Daten von Solarmodulen.....	141
4.6	Solargenerator und Last.....	142
4.6.1	Widerstandslast.....	142
4.6.2	Gleichspannungswandler.....	143
4.6.3	Tiefsetzsteller.....	144
4.6.4	Hochsetzsteller.....	147
4.6.5	Weitere Gleichspannungswandler.....	147
4.6.6	MPP-Tracker.....	148
4.7	Akkumulatoren.....	151
4.7.1	Akkumulatorarten.....	151
4.7.2	Der Bleiakкумуляtor.....	152
4.7.3	Andere Akkumulatortypen.....	157
4.7.4	Akkumulatorsysteme.....	159
4.7.5	Andere Speichermöglichkeiten.....	162

4.8 Wechselrichter.....	163
4.8.1 Wechselrichtertechnologie.....	163
4.8.2 Wechselrichter in der Photovoltaik.....	168
<b>5 Windkraft.....</b>	<b>172</b>
5.1 Einleitung.....	172
5.2 Dargebot von Windenergie.....	173
5.2.1 Entstehung des Windes.....	173
5.2.2 Angabe der Windstärke.....	174
5.2.3 Windgeschwindigkeitsverteilungen.....	174
5.2.4 Einfluß der Umgebung und Höhe.....	177
5.3 Nutzung der Windenergie.....	179
5.3.1 Im Wind enthaltene Leistung.....	179
5.3.2 Widerstandsläufer.....	182
5.3.3 Auftriebsläufer.....	184
5.4 Bauformen von Windkraftanlagen.....	188
5.4.1 Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse.....	188
5.4.2 Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse.....	190
5.5 Elektrische Maschinen.....	196
5.5.1 Elektrische Wechselstromrechnung.....	197
5.5.2 Drehfeld.....	200
5.5.3 Synchronmaschine.....	205
5.5.4 Asynchronmaschine.....	210
5.6 Elektrische Anlagenkonzepte.....	217
5.6.1 Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung.....	217
5.6.2 Synchrongenerator mit direkter Netzankopplung.....	220
5.6.3 Synchrongenerator mit Zwischenkreis.....	221
5.6.4 Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren.....	222
5.7 Netzbetrieb.....	223
5.7.1 Anlagenertrag.....	223
5.7.2 Netzanschluß.....	224
<b>6 Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....</b>	<b>227</b>
6.1 Einleitung.....	227
6.2 Klassische Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	228
6.2.1 Berechnungen ohne Kapitalverzinsung.....	228
6.2.2 Berechnungen mit Kapitalverzinsung.....	233
6.2.3 Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien.....	237
6.2.4 Kosten konventioneller Energiesysteme.....	238
6.3 Externe Kosten des Energieverbrauchs.....	239
6.3.1 Subventionen bei konventionellen Energien.....	239
6.3.2 Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden.....	240
6.3.3 Sonstige externe Kosten.....	241
6.3.4 Internalisierung der externen Kosten.....	242
6.4 Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	243
6.4.1 Unendliche Kapitalvermehrung.....	243
6.4.2 Die Verantwortung des Kapitals.....	245

<b>7 Simulationsprogramme.....</b>	<b>246</b>
7.1 Einleitung.....	246
7.2 Die Software zum Buch.....	246
7.3 Kurzbeschreibung ausgewählter Software.....	249
7.3.1 Solarstrahlung.....	249
7.3.2 Solarthermie.....	250
7.3.3 Photovoltaik.....	251
7.3.4 Windkraft.....	253
7.3.5 Gebäudesimulation.....	253
7.3.6 Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	255
7.3.7 Ausbildung.....	255
<b>Anhang.....</b>	<b>256</b>
SUNAE-Algorithmus zur Sonnenstandsrechnung.....	256
Wichtige naturwissenschaftliche Konstanten.....	257
Wichtige englische und US-amerikanische Einheiten.....	257
Übersicht über grundlegende Tabellen und Formelzeichen.....	257
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>258</b>
<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	<b>263</b>