

Andreas Ratka, Sabine Homann-Wenig,  
Bruno Ehrmaier (Hrsg.)

# **Technik Erneuerbarer Energien**

210 Abbildungen  
39 Tabellen

Verlag Eugen Ulmer Stuttgart

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung – Struktur des Energiebedarfs in Deutschland</b> (A. Ratka) . . . . .	<b>13</b>
1.1	Energiebedarfsstruktur in Deutschland . . . . .	14
1.2	Gründe für die Nutzung erneuerbarer Energien . . . . .	17
1.3	Hindernisse bei der Nutzung erneuerbarer Energien . . . . .	26
1.4	Potentiale . . . . .	32
1.5	Wege zu einem Energieversorgungssystem basierend auf erneuerbaren Energien und Energieeffizienz . . . . .	33
	Literatur . . . . .	41
	Glossar . . . . .	42
<b>2</b>	<b>Photovoltaik</b> (B. Ehrmaier) . . . . .	<b>44</b>
2.1	Einleitung . . . . .	44
2.1.1	Energieformen von der Sonne . . . . .	44
2.1.2	Direkte Nutzung der Sonne durch Photovoltaik . . . . .	46
2.2	Funktionsprinzip einer Photovoltaikzelle . . . . .	53
2.2.1	Grundlagen der Halbleiterphysik der Diode . . . . .	53
2.2.2	pn-Übergang als Grundlage der Photovoltaikzelle . . . . .	53
2.2.3	Strom-Spannungskurve . . . . .	54
2.3	Relevante elektrische Kenndaten einer Photovoltaikzelle . . . . .	56
2.4	Funktionsweise und Aufbau eines Photovoltaiksystems . . . . .	59
2.4.1	Schematischer Aufbau einer Photovoltaikzelle . . . . .	59
2.4.2	Funktion und Aufbau eines Photovoltaikmoduls . . . . .	61
2.4.3	Umwandlung der elektrischen Energie mittels Wechselrichter . . . . .	63
2.5	Herstellung einer Photovoltaikzelle . . . . .	66
2.6	Schematischer Aufbau einer Photovoltaikdachanlage . . . . .	70
2.7	Wirkungsgrade im Bereich der Photovoltaik . . . . .	72
2.8	Zukunft der Photovoltaik . . . . .	74
2.9	Mehrfachnutzung von Photovoltaik . . . . .	75
	Literatur . . . . .	76

<b>3</b>	<b>Solarthermie</b> (B. Ehrmaier, A. Ratka) .....	78
3.1	Einführung .....	78
3.2	Physikalische Grundlagen für die Solarthermie .....	79
3.2.1	Hauptsätze der Wärmelehre .....	79
3.2.2	Wärmetransportmechanismen .....	80
3.3	Aufbau eines solarthermischen Kollektors .....	84
3.4	Kollektortheorie .....	87
3.5	Systemtechnik. ....	99
3.5.1	Übersicht über solarthermische Kollektoren .....	99
3.5.2	Wärmeträgermedium .....	100
3.5.3	Optimierungsmaßnahmen zur Erhöhung des Wirkungsgrades. ....	103
3.5.4	Aufbau einer solarthermischen Anlage .....	103
3.5.5	Zentraler Pufferspeicher .....	104
3.5.6	Wärmebedarf eines Gebäudes. ....	107
3.6	Solarthermische Kraftwerke .....	108
3.7	Zukunft der Solarthermie .....	111
	Literatur .....	113
<b>4</b>	<b>Windenergie</b> (W. Baur) .....	115
4.1	Einführung .....	115
4.1.1	Allgemeines. ....	115
4.1.2	Systematik der Windenergienutzung .....	115
4.2	Physikalische Grundlagen .....	117
4.3	Aerodynamik der Rotorblätter .....	123
4.3.1	Allgemeines. ....	123
4.3.2	Tragflügelaerodynamik .....	125
4.3.3	Rotorblattaerodynamik .....	130
4.4	Kurzer Historischer Überblick .....	134
4.5	Wind und Standortfragen .....	136
4.6	Konstruktiver Aufbau moderner Windenergieanlagen .	139
4.6.1	Turm und Gondel .....	140
4.6.2	Rotorblätter, Pitch- und Stallprinzipien .....	141
4.6.3	Getriebe und Generator .....	145
4.7	Leistungskennlinien und Ertragsberechnungen .....	149
	Literatur- und Quellenverzeichnis .....	154
<b>5</b>	<b>Geothermie/Thermogeologie</b> (W. Pyka) .....	156
5.1	Einführung .....	156
5.2	Aufbau der Erde .....	157
5.3	Thermische Verhältnisse .....	160
5.3.1	Temperaturen, Wärmefluss und thermisches Potenzial .	160
5.3.2	Die oberflächennahe thermischen Verhältnisse .....	163
5.4	Geologische Grundlagen .....	163
5.4.1	Gesteine .....	163
5.4.2	Thermische Eigenschaften von Gesteinen .....	166

5.4.3	Lockergesteine und Böden .....	167
5.4.4	Grundwasser .....	170
5.4.5	Thermische Eigenschaften von Böden .....	173
5.5	Möglichkeiten der Erdwärmenutzung .....	175
5.5.1	Abgrenzung von oberflächennaher und tiefer Geothermie .....	175
5.5.2	Tiefe Geothermie .....	177
5.5.3	Oberflächennahe Geothermie .....	180
	Literatur .....	187
	Glossar .....	188
<b>6</b>	<b>Biogas</b> (R. Schaidhauf) .....	190
6.1	Einführung .....	190
6.1.1	Allgemeines .....	190
6.1.2	Aspekte der Biogasnutzung in Deutschland .....	190
6.1.3	Aktuelle Nutzung von Biogas in Deutschland .....	191
6.2	Biochemische Konversion .....	193
6.2.1	Allgemeines .....	193
6.2.2	Substrate .....	193
6.2.3	Phasenmodell der Biogasentstehung .....	194
6.2.4	Randbedingungen der Biogasgewinnung .....	195
6.2.5	Betriebsbedingungen der Biogasgewinnung .....	195
6.2.6	Stoffkreisläufe .....	198
6.3	Technische Systeme zur Bio(erd)gasgewinnung .....	198
6.3.1	Allgemeines .....	198
6.3.2	Verfahren zur Biogasgewinnung .....	199
6.3.3	Verfahren zur Bioerdgasgewinnung .....	202
6.4	Technische Systeme zur Bio(erd)gasnutzung .....	203
6.4.1	Allgemeines .....	203
6.4.2	Charakteristika von Bio(erd)gas .....	203
6.4.3	Verfahren zur energetischen Nutzung .....	205
6.4.4	Systemintegration .....	208
6.5	Weiterführende Literatur/Links .....	209
	Literatur .....	210
	Glossar .....	211
<b>7</b>	<b>Biogene Festbrennstoffe</b> (R. Schaidhauf) .....	212
7.1	Einführung .....	212
7.1.1	Allgemeines .....	212
7.1.2	Aspekte der Nutzung biogener Festbrennstoffe in Deutschland .....	214
7.1.3	Aktuelle Nutzung von biogenen Festbrennstoffen in Deutschland .....	215
7.2	Biogene Festbrennstoffe .....	217
7.2.1	Allgemeines .....	217
7.2.2	Arten und Quellen .....	217

7.2.3	Bereitstellung und Aufbereitung	219
7.2.4	Brennstoff-Charakteristika	220
7.2.5	Ascheeigenschaften.	223
7.3	Thermochemische Konversion	224
7.3.1	Allgemeines.	224
7.3.3	Pyrolyse.	226
7.3.4	Vergasung	226
7.3.5	Verbrennung.	227
7.4	Nutzung von biogenen Festbrennstoffen	228
7.4.1	Allgemeines.	228
7.4.2	Vergasungsanlagen	230
7.4.3	Verbrennungsanlagen	232
7.5	Weiterführende Literatur/Links	233
	Literatur	233
	Glossar	234

<b>8</b>	<b>Kraftstoffe auf Basis von Ölen und Fetten als regenerative Energieträger</b> (H. Riepl, E. Remmele)	236
8.1	Öle und Fette, Herkunft, Anbau	236
8.2	Pflanzenölgewinnung	238
8.3	Chemie der Pflanzenöle	240
8.3.1	Triglyceride	240
8.3.2	Gesättigte, ungesättigte, mehrfach ungesättigte Fettsäuren	241
8.3.3	Umesterung.	243
8.3.4	Hydrierung, HVO-Produkte	244
8.3.5	Begleitstoffe in Pflanzenölen (Phospholipide, Lecithine)	244
8.4	Kraftstoffe aus Pflanzenölen	244
8.4.1	Qualitätsmerkmale für Kraftstoffe aus Pflanzenölen – Kraftstoffnormen	245
8.4.2	Kraftstoffspezifische Eigenschaften im Vergleich	252
8.4.3	Verwendung	252
	Literatur	254

<b>9</b>	<b>Energie aus Abfall</b> (G. Lautenschlager)	256
9.1	Einleitung	256
9.2	Definitionen und Daten zu Abfällen.	258
9.2.1	Abfallbegriff.	258
9.2.2	Abfallarten	258
9.2.3	Europäisches Abfallverzeichnis.	260
9.2.4	Abfälle zur Verwertung/zur Beseitigung.	260
9.2.5	Eigenschaften von Abfällen	262
9.2.6	Abfallaufkommen	265
9.2.7	Nutzbares Energiepotential.	268
9.3	Thermische Abfallbehandlung	271
9.3.1	Müllannahme und -zwischenlagerung.	271

9.3.2	Feuerung . . . . .	272
9.3.3	Kesselanlage . . . . .	275
9.3.4	Wasser-Dampf-Kreislauf . . . . .	277
9.3.5	Rauchgasreinigung . . . . .	278
9.4	Energetische Abfallverwertung . . . . .	281
9.4.1	Energetische Abfallverwertung in Zementwerken . . . . .	281
9.4.2	Energetische Abfallverwertung im Hochofen . . . . .	285
9.4.3	Energetische Abfallverwertung in Kraftwerken . . . . .	286
9.4.4	Energetische Abfallverwertung in Ersatzbrennstoff-Kraftwerken . . . . .	287
9.5	Fazit . . . . .	289
	Literatur . . . . .	289
<b>10</b>	<b>Kraft-Wärme-Kopplung (N. Huber)</b> . . . . .	292
10.1	Grundlagen . . . . .	292
10.1.1	Was wird unter Kraft-Wärme-Kopplung verstanden . . . . .	292
10.1.2	Bedeutung der KWK für erneuerbare Energien . . . . .	293
10.1.3	Physikalische Grundlagen der KWK . . . . .	294
10.1.4	Getrennte Erzeugung von Wärme und Strom . . . . .	298
10.1.5	Gekoppelte Erzeugung von Wärme und Strom . . . . .	300
10.1.6	Auslegen einer KWK-Anlage . . . . .	306
10.2	Anwendungen . . . . .	307
10.2.1	Mikro BHKW . . . . .	308
10.2.2	BHKW mit Nahwärmeversorgung . . . . .	310
10.2.3	Kraft-Wärme-Kopplung in den Sommermonaten . . . . .	313
	Verwendete und weiterführende Literatur . . . . .	314
	Glossar . . . . .	314
<b>11</b>	<b>Thermische Energiespeicher (N. Huber)</b> . . . . .	315
11.1	Grundlagen . . . . .	315
11.1.1	Notwendigkeit thermischer Energiespeicher bei Verwendung erneuerbarer Energien . . . . .	315
11.1.2	Physikalische Grundlagen thermischer Energiespeicherung . . . . .	318
11.1.3	Allgemeiner Aufbau thermischer Energiespeicher . . . . .	325
11.2	Thermische Energiespeicher mit Wasser . . . . .	329
11.2.1	Schichtenspeicher für Warmwasser und Heizungsanlagen . . . . .	330
11.2.2	Warmwasserspeicher für Nahwärmesysteme . . . . .	331
11.2.3	Saisonale Warmwasserspeicher . . . . .	331
11.3	Latentwärmespeicher . . . . .	332
11.4	Hochtemperaturspeicher . . . . .	334
11.5	Thermochemische Speicher . . . . .	335
	Literatur . . . . .	337
	Glossar . . . . .	338

<b>12</b>	<b>Speicherung von elektrischer Energie</b>	
	(B. Ehrmaier) .....	339
12.1	Einführung .....	339
12.2	Physikalische Grundlagen für Energiespeicher .....	340
12.3	Potentielle Energiespeicher für Erneuerbare Energien ..	343
12.4	Mechanische Strom-Energiespeicher .....	344
12.4.1	Rotationsspeicher .....	345
12.4.2	Potentielle Energiespeicher (Pumpspeicherkraftwerke)	346
12.4.3	Druckluftspeicher .....	347
12.5	Elektrische und elektrochemische Energiespeicher ....	348
12.5.1	Übersicht elektrischer und elektrochemischer Energie- speicher .....	349
12.5.2	Elektrische Energiespeicher .....	350
12.5.3	Elektrochemische Energiespeicher mit eingelagertem Speichermedium .....	351
12.5.4	Elektrochemische Energiespeicher mit ausgelagertem Speichermedium .....	357
12.5.5	Chemische Energiespeichersysteme .....	361
12.6	Speicher-Netz-Wechselwirkung .....	363
12.7	Fazit .....	364
	Literatur .....	366
<b>13</b>	<b>Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen</b>	
	(S. Homann-Wenig) .....	367
13.1	Auszahlungen bzw. Kosten im Rahmen von Errichtung und Betrieb von Erneuerbare-Energien-Projekten. ....	368
13.1.1	Die kapitalgebundenen Kosten .....	368
13.1.2	Die betriebsgebundenen Kosten .....	373
13.1.3	Die sonstigen Kosten .....	374
13.1.4	Die verbrauchsgebundenen Kosten .....	375
13.2	Die finanzielle Förderung von Strom aus dem Betrieb von Erneuerbare-Energien-Anlagen. ....	376
13.2.1	Strom aus Wasserkraft (§ 23 EEG) .....	379
13.2.2	Strom aus Biomasse (§§ 27, 27a bis 27c EEG) .....	380
13.2.3	Strom aus Geothermie (§ 28 EEG) .....	382
13.2.4	Strom aus Windenergie (§§ 49 und 50 EEG) .....	382
13.2.5	Strom aus solarer Strahlungsenergie (§ 51 EEG) .....	385
13.3	Methodische Grundlagen der Investitionsrechnung. ....	386
13.3.1	Die Kapitalwertmethode .....	386
13.3.2	Die Annuitätenmethode .....	387
13.3.3	Die Ermittlung des Internen Zinsfußes .....	388
13.3.4	Die mehrperiodische Amortisationsrechnung .....	389
13.4	Die Ermittlung der Energiegestehungskosten und deren praktische Bedeutung .....	389
	Literatur .....	392
	Glossar .....	392

<b>14</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Bilanzen in der Energiewirtschaft</b>	
	(S. Homann-Wenig) .....	393
14.1	Die Ökobilanz als Instrument zur Bewertung von Umweltwirkungen .....	393
14.2	Die Umweltwirkungen der Strom- und Wärme- erzeugung .....	397
	Literatur .....	404
	<b>Register</b> .....	405

## Bildquellen

Abb. 2.6: mit freundlicher Genehmigung von AT&T Archives and History Center (courtesy of AT&T Archives and History Center)

Abb. 10.11: Firmenfoto SenerTec GmbH

Abb. 11.7: Nanisimova/Shutterstock

Abb. 11.8: Haase GfK-Technik

Abb. 11.11: AEST Final PublicReport

Artur Piestricow, Stuttgart, fertigte folgende Abbildungen nach Vorlagen der Autoren: Abb. 1.1–1.10, 1.12–1.19, 2.2, 2.4, 2.7, 2.10, 2.16–2.18, 2.22–2.27, 2.30, 2.31, 3.3, 3.6–3.11, 3.14, 3.15, 4.1–4.25, 5.1–5.26, 6.1–6.8, 7.1–7.10, 8.1–8.6, 9.1–9.4, 9.11, 10.1, 10.2, 10.8–10.10, 10.13, 11.1–11.10, 12.2, 12.8–12.10, 12.12, 13.1, 14.1–14.4

Alle anderen Abbildungen stammen, wenn nicht anders vermerkt, von den Autoren.