

Manfred Kleemann · Michael Meliß

Regenerative Energiequellen

Zweite, völlig neubearbeitete Auflage
mit 216 Abbildungen und 75 Tabellen

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo
Hong Kong Barcelona Budapest

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Formelzeichen XV

1	Nutzungsmöglichkeiten regenerativer Energiequellen	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Geothermische Energie	5
1.3	Gezeitenenergie	9
1.4	Wasserkraft	11
1.5	Windenergie	12
1.6	Wellenenergie	12
1.7	Energie der Meeresströmung	14
1.8	Umweltwärme	15
1.9	Biologische und chemische Energiewandlung	17
1.10	Photoelektrische Energiewandlung	18
1.11	Solarthermische Energiewandlung	18
1.12	Diskussion des möglichen Beitrags zur Energieversorgung ..	19
1.12.1	Der Potentialbegriff	19
1.12.2	Der heutige Beitrag	19
1.12.3	Nachteile und Vorteile regenerativer Energiequellen	20
1.12.4	Der zukünftige Beitrag	22
2	Darbietung solarer Strahlungsenergie	25
2.1	Strahlung und Schwächungsmechanismen	25
2.1.1	Extraterrestrische Strahlung	25
2.1.2	Gang durch die Atmosphäre	27
2.1.3	Strahlung auf geneigte Flächen	28
2.2	Terrestrisch nutzbare Strahlung	32
2.2.1	Strahlungsbilanzen	32
2.2.2	Das allgemeine Transmissionsgesetz	35
2.2.3	Streuung in der Atmosphäre	36
2.2.4	Absorption der Sonnenstrahlung	39
2.2.5	Direkte Sonnenstrahlung	40
2.2.6	Himmelsstrahlung	41
2.2.7	Globalstrahlung	43
2.3	Messung solarer Strahlungsenergie	45
2.4	Zusammenhang zwischen der Globalstrahlung auf horizontale Flächen und derjenigen auf geneigte Flächen	47

3	Niedertemperaturkollektoren	50
3.1	Aufbau und Funktionsweise des Flachkollektors	50
3.2	Die optischen Eigenschaften des Absorbers und der Abdeckung	52
3.3	Bestimmung der Nutzleistung und des Wirkungsgrads	56
3.4	Transmissionsverluste der Kollektorabdeckung	58
3.4.1	Bestimmung des Reflexionskoeffizienten mit Hilfe der Brechungssindizes	58
3.4.2	Bestimmung des Transmissionskoeffizienten aus den Reflexionskoeffizienten ohne Absorption im Glas	60
3.4.3	Bestimmung der Transmissionskoeffizienten bei alleiniger Berücksichtigung der Absorption	62
3.4.4	Bestimmung des Gesamttransmissionskoeffizienten bei Reflexion und Absorption	62
3.5	Das HWB-Kollektormodell	64
3.6	Vergleich der drei Kollektorgleichungen	65
3.7	Test von Niedertemperaturkollektoren	67
3.8	Kollektorpreise	68
4	Solare Niedertemperatursysteme	70
4.1	Solarbeheizte Freischwimmbäder	70
4.1.1	Günstige Voraussetzungen für die Solarenergienutzung bei Freischwimmbädern	70
4.1.2	Berechnung des Wärmebedarfs ohne Beckenabdeckung	70
4.1.2.1	Bilanzierung der Wärmeströme eines Freibads	70
4.1.2.2	Berechnung der Strahlungs- und Konvektionsverluste	71
4.1.2.3	Berechnung der Verdunstungsverluste	71
4.1.2.4	Transmissionsverluste an das Erdreich	73
4.1.2.5	Berechnung des Wärmezugewinns durch Sonneneinstrahlung ins Becken	73
4.1.2.6	Berechnung des gesamten saisonalen Heizwärmbedarfs	74
4.1.3	Reduktion des Wärmebedarfs durch eine Beckenabdeckung	75
4.1.4	Berechnung der solaren Deckungsrate	76
4.1.5	Wirtschaftlichkeit der Beckenwassererwärmung	81
4.2	Brauchwassererwärmung und Raumheizung	84
4.2.1	Thermosiphonanlagen	84
4.2.1.1	Thermosiphonischer Massenstrom	85
4.2.1.2	Effektive Rohrleitungslänge	88
4.2.1.3	Dichte-Höhe-Diagramm und Auftriebsflächen	89
4.2.1.4	Gestaltung von Thermosiphonsystemen	89
4.2.2	Warmwassersysteme mit Zwangsumlauf	91
4.2.2.1	Einfluß von Kollektorfläche und Speichervolumen	92
4.2.2.2	Einfluß anderer Systemparameter	93
4.2.3	Auslegungshinweise	94
4.2.3.1	Energiebedarf	94

4.2.3.2	Solares Energieangebot	96
4.2.3.3	Kollektoren	97
4.2.3.4	Speicher	98
4.2.3.5	Sonstige Systemkomponenten	98
4.2.3.6	Kosten der Warmwasserbereitung	100
4.2.4	Raumheizung mit NT-Kollektoren	102
5	Konzentrierende Kollektoren	105
5.1	Geometrie der Parabel	105
5.2	Aufbau eines konzentrierenden Kollektors	106
5.3	Maximales Konzentrationsverhältnis und maximale Temperatur	109
5.3.1	Bestimmung des maximalen Konzentrationsverhältnisses	109
5.3.2	Bestimmung der maximalen Absorbertemperatur	111
5.3.3	Konzentrationsverhältnis und Temperatur für verschiedene Kollektoren	114
5.4	Verluste am konzentrierenden Kollektor	114
5.4.1	Unvollständige Reflexion des Spiegels	115
5.4.2	Oberflächenfehler	115
5.4.3	Orientierungsfehler	116
5.4.4	Reflexion und Emission des offenen Absorbers	116
5.4.5	Konvektion am offenen Absorber	118
5.4.6	Absorber mit transparenter Umhüllung	118
5.5	Nutzleistung und Wirkungsgrad	118
5.6	Gegenüberstellung von konzentrierendem Kollektor und Flachkollektor	121
6	Solarthermische Stromerzeugung	123
6.1	Unterscheidungsmerkmale für Farm- und Towerkraftwerke	123
6.2	Beispiele solarthermischer Kraftwerke	124
6.3	Arbeitstemperatur und Wirkungsgrad	125
6.4	Das Farmkraftwerk	127
6.4.1	Aufbau von Farmanlagen mit Parabolrinnen	127
6.4.2	Das Kollektorfeld	129
6.4.3	Der Speicher	131
6.4.4	Der Arbeitskreislauf	133
6.4.5	Das Energieflußbild	135
6.4.6	Regelung der Anlage	136
6.5	Das Towerkraftwerk	137
6.5.1	Konzepte für Absorber, Turm und Spiegelfeld	137
6.5.2	Aspekte der Feldauslegung	139
6.5.3	Nachführung der Heliostaten	145
6.5.4	Der Receiver	146
6.5.5	Kreislaufkonzepte	153
6.5.6	Nutzungsgrad	154

6.6	Systemvergleich und Kosten	155
6.6.1	Systemvarianten	155
6.6.2	Wirtschaftlichkeit	155
7	Photovoltaische Stromerzeugung	158
7.1	Einleitung	158
7.2	Grundlagen	159
7.2.1	Bändermodell der Elektronen im Festkörper	159
7.2.2	Die Solarzelle ohne Bestrahlung	164
7.2.3	Absorption von Photonen	166
7.2.4	Ladungsträger-Rekombination	167
7.2.5	Die Solarzelle unter Bestrahlung	168
7.2.6	Schottky-Zellen, MIS-Zellen	170
7.2.7	Hetero-Zellen	170
7.3	Verhalten einzelner Solarzellen	171
7.3.1	Strom-Spannungskennlinie	171
7.3.2	Ersatzschaltbild realer Solarzellen	175
7.4	Heute gebräuchliche Solarzellen	176
7.4.1	Herstellung von Silicium-Solarzellen	176
7.4.2	Dünnsschicht-Solarzellen	180
7.4.3	Sonstige Solarzellen	182
7.5	Konzentrierende Solarzellen	183
7.6	Solarzellensysteme und Kosten	186
7.6.1	Aufbau von Solargeneratoren	186
7.6.2	Einsatzmöglichkeiten von Solargeneratoren	187
7.6.3	Wirtschaftlichkeit	188
8	Darbietung der Biomasse	190
8.1	Entstehung der Biomasse	190
8.2	Erscheinungsformen der Biomasse	191
8.3	Das Potential der Biomasse	192
8.3.1	Weltweites Potential	192
8.3.2	Potential in der BRD	194
9	Techniken zur energetischen Nutzung der Biomasse	200
9.1	Einleitung	200
9.2	Physikalische Biokonversionsverfahren	202
9.2.1	Verdichtung zu Biobrennstoffen	202
9.2.2	Extraktion von Pflanzenölen	203
9.3	Thermochemische Biokonversionsverfahren	204
9.3.1	Verbrennung	204
9.3.2	Vergasung	210
9.3.3	Verflüssigung	214
9.3.3.1	Verflüssigung durch chemische Reduktion	214
9.3.3.2	Pyrolyse	214

9.3.3.3	Verflüssigung durch Methanolsynthese	218
9.4	Biologische Konversionsverfahren	219
9.4.1	Einführung	219
9.4.2	Biogaserzeugung	221
9.4.2.1	Verfahrenstechnische Grundlagen	221
9.4.2.2	Einflußparameter	222
9.4.2.3	Ausführung von Biogasanlagen	228
9.4.2.4	Wirtschaftlichkeit von Biogas	231
9.4.3	Äthanolerzeugung	232
9.4.3.1	Ausgangsstoffe und Verfahren	232
9.4.3.2	Der Fermentationsprozeß	235
9.4.3.3	Energiebilanz des Gesamtprozesses	237
9.4.3.4	Äthanol als Motorkraftstoff	239
9.4.3.5	Wirtschaftlichkeit von Äthanol	240
10	Darbietung der Windenergie	241
10.1	Entstehung des Winds und des globalen Zirkulationssystems	241
10.2	Windströmung	244
10.2.1	Windstärke	244
10.2.2	Windrichtung	244
10.2.3	Jahresmittel der Windgeschwindigkeit	245
10.2.4	Jahresgang der mittleren Windgeschwindigkeit	246
10.2.5	Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit	248
10.2.6	Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit	248
10.2.7	Extremwerte der Windgeschwindigkeit	251
10.2.8	Windströmung über Hindernisse und Anlagenabstand	253
10.3	Die Leistungsdichte des Winds	253
10.4	Vergleich von Sonnen- und Windenergieangebot	256
10.5	Windmessung	257
10.5.1	Staudruckmeßverfahren	257
10.5.2	Hitzdrahtanemometer	258
10.5.3	Schalenkreuzanemometer	258
10.5.4	Windrichtungsanzeige	260
11	Windenergiekonverter	262
11.1	Historische Entwicklung	262
11.2	Strömungsmechanische Grundlagen	264
11.2.1	Idealer Leistungsbeiwert	264
11.2.2	Leistungsbeiwert eines Widerstandsläufers	266
11.2.3	Strömung um ein Tragflügelprofil	269
11.3	Aerodynamik der Windturbine	270
11.3.1	Auftriebsbeiwert und Widerstandsbeiwert	270
11.3.2	Geschwindigkeiten und Luftkräfte am Rotor	272
11.3.3	Verwindung des Rotorblatts	275
11.3.4	Aerodynamische Verluste am Rotorblatt	275

11.3.5	Leistungsbeiwert und Schnellaufzahl	278
11.3.6	Momentenbeiwert und Schnellaufzahl	279
11.3.7	Gestaltung der Blattbreite	280
11.3.8	Profilauswahl	284
11.3.9	Optimale Rotordrehzahl	285
11.3.10	Darrieus-Rotor	287
11.4	Belastungen an einer Windkraftanlage	288
11.4.1	Vorbemerkungen	288
11.4.2	Luft- und Massenkräfte am Rotor	289
11.4.3	Kräfte durch den Betriebsablauf	292
11.4.4	Schwingungsbeanspruchung	292
11.5	Elektrisches System	293
11.6	Regelung	295
11.6.1	Schlechte Regelbarkeit bei Langsamläufern	295
11.6.2	Regelung von Schnellläufern	296
11.7	Wirtschaftlichkeit	298
	Literaturverzeichnis	302
	Sachverzeichnis	311