

US

1.	Überblick über die Nutzung der Solarenergie	13
1.1.	<i>Historischer Überblick</i>	13
1.2.	<i>Grundsätzliche Probleme bei der Solarenergienutzung</i>	15
1.3.	<i>Entwicklungsstand der thermischen Umwandlung der Solarenergie</i>	16
1.4.	<i>Entwicklungsstand der fotovoltaischen Umwandlung der Solarenergie</i>	17

GS

2.	Grundgesetze der Solarstrahlung	19
2.1.	<i>Strahlungsgesetze</i>	20
2.2.	<i>Solarstrahlung</i>	22
2.2.1.	<i>Direkte Sonnenstrahlung</i>	23
2.2.1.1.	<i>Schwächung der direkten Strahlung durch die Atmosphäre</i>	23
2.2.1.2.	<i>Berechnung der direkten Strahlung auf beliebig geneigte Flächen</i>	24
2.2.2.	<i>Berechnung der diffusen Strahlung</i>	27
2.2.3.	<i>Berechnung der reflektierten Strahlung</i>	27
2.3.	<i>Strahlungsdaten</i>	28
2.3.1.	<i>Strahlungsdaten von Potsdam</i>	29
2.3.1.1.	<i>Typische Tagesgänge der Strahlung</i>	29
2.3.1.2.	<i>Klassierverfahren</i>	38
2.3.1.3.	<i>Sonnenscheindauer</i>	41
2.3.1.4.	<i>Schwankungsbreite der Strahlungsdaten</i>	43
2.3.1.5.	<i>Berechnungsbeispiel für die Umrechnung von Strahlungsdaten</i>	44
2.3.2.	<i>Regionale Strahlungsverteilung in Mitteleuropa</i>	45
2.4.	<i>Daten der Außentemperaturen, der Luftfeuchte und des Windes</i>	49

SK

3.	Aufbau und Berechnung von Solarkollektoren	51
3.1.	<i>Aufbau und Wirkungsweise des Flachkollektors</i>	51
3.2.	<i>Berechnung des Wärmegewinns von Flachkollektoren</i>	53
3.2.1.	<i>Allgemeine Betrachtung</i>	53
3.2.2.	<i>Strahlungsverluste der Abdeckung</i>	55
3.2.2.1.	<i>Reflexion an einer Grenzschicht</i>	56
3.2.2.2.	<i>Absorption der Strahlung in der Abdeckung</i>	58
3.2.2.3.	<i>Transmission durch eine und mehrere Platten</i>	58
3.2.2.4.	<i>Beschichtungen der Abdeckung</i>	59
3.2.2.5.	<i>Einfluß der Verschmutzung</i>	60

3.2.3.	Strahlungsabsorption in der Absorberplatte	60
3.2.4.	Berechnung des Konversionsfaktors	62
3.2.5.	Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten	63
3.2.5.1.	Wärmeübertragung durch Strahlung	63
3.2.5.2.	Wärmeübertragung durch natürliche Konvektion	64
3.2.5.3.	Wärmeübertragung an der Kollektoraußenseite	67
3.2.5.4.	Wärmedurchgang durch die Isolation	67
3.2.5.5.	Abschätzung des Wärmedurchgangskoeffizienten verschiedener Kollektoren	68
3.2.6.	Berechnung des Wärmetransports.	68
3.3.	<i>Energetischer Gewinn von Flachkollektoren</i>	70
3.3.1.	Maximale Temperatur des Kollektors	70
3.3.2.	Energetischer Gewinn von Solarkollektoren unter Berücksichtigung der meteorologischen Daten	72
3.3.2.1.	Einfaches Berechnungsschema zur Vorprojektierung.	72
3.3.2.2.	Berücksichtigung regionaler Unterschiede des Strahlungsangebots.	74
3.3.3.	Tagesgang des Energiegewinns	74
3.3.4.	Dynamisches Verhalten von Solarkollektoren	77
3.4.	<i>Konstruktionselemente von Solarkollektoren</i>	79
3.4.1.	Werkstoffprobleme	79
3.4.2.	Konstruktionsprobleme	81
3.5.	<i>Kollektoren mit Luft als Wärmeübertragungsmedium</i>	82
3.6.	<i>Meßtechnische Erfassung von Solarkollektorparametern</i>	84
3.7.	<i>Strahlungskonzentrierende Anordnungen solartechnischer Anlagen</i>	85
3.7.1.	Konzentrierende Kollektoren	85
3.7.2.	Solarthermische Elektroenergieerzeugung	87

SA

4.	Solarkollektoranlage	89
4.1.	<i>Solarkollektorkreislauf</i>	89
4.1.1.	Definition und Systematisierung	89
4.1.2.	Anordnung und Aufstellung der Solarkollektoren	93
4.1.3.	Schaltung der Solarkollektoren	101
4.1.4.	Wärmeträgermedium	103
4.2.	<i>Wärmeübertrager</i>	106
4.3.	<i>Speicherung</i>	109
4.3.1.	Aufgabe der Speicherung	109
4.3.2.	Latentwärmespeicher	111
4.3.3.	Wärmespeicher mit festen Stoffen.	114
4.3.4.	Flüssigkeitsspeicher	114
4.4.	<i>Kopplung mit den Verbrauchern</i>	117
4.4.1.	Warmwasserbereitung	118
4.4.1.1.	Einsatzkriterien	118
4.4.1.2.	Realisierungsvarianten	121
4.4.1.3.	Lösungsvorschlag für die Auslegung einer Brauchwarmwassererzeugungsanlage	121

4.4.2.	Heizung	123
4.4.2.1.	Einsatzkriterien	123
4.4.2.2.	Luftheizung	124
4.4.2.3.	Raumflächenheizung	124
4.4.2.4.	Warmwasserheizung	127
4.4.2.5.	Schwimmbadheizung	128
4.4.3.	Kühlung	129
4.5.	<i>Aspekte bei der Auslegung und Dimensionierung</i>	131
4.5.1.	Regelung	131
4.5.2.	Messung der Regelgrößen und Betriebsparameter	132
4.5.3.	Hinweise für Auslegung und Inbetriebnahme	132
4.5.4.	Sicherheitstechnische Aspekte	134

BA

5.	Beispielanlagen	135
5.1.	<i>Anlage zur Brauchwarmwassererzeugung</i>	135
5.1.1.	Aufgabenstellung und Ausgangswerte	135
5.1.2.	Solarkollektorfläche und Energiegewinn	135
5.1.3.	Anlagenschaltung und Dimensionierung	136
5.1.4.	Regelung	139
5.2.	<i>Anlage zur Schwimmbadheizung</i>	139
5.2.1.	Allgemeine Aspekte	139
5.2.2.	Auslegung der Anlage	141
5.2.2.1.	Ausgangsdaten	141
5.2.2.2.	Vorabdimensionierung	141
5.2.2.3.	Anlagendimensionierung	143
5.2.3.	Regelung	146
5.2.4.	Betriebserfahrungen	147
5.3.	<i>Wärmepumpenanlagen mit Solarabsorbern</i>	150
5.4.	<i>Ökonomische Betrachtungen</i>	156

FW

6.	Fotovoltaische Wandlung der solaren Strahlungsenergie	159
6.1.	<i>Einleitende Übersicht</i>	159
6.1.1.	Fotoeffekte und fotovoltaischer Effekt	159
6.1.2.	Fotoelemente, Solarzellen, Solarbatterien	162
6.1.3.	Fotothermische und fotovoltaische Wandlung sowie Wirkungsgrad	163
6.1.4.	Historische Entwicklung	164
6.1.5.	Übersicht über derzeitige Solarzellen	164
6.2.	<i>Physikalische Grundlagen fotovoltaischer Energiewandler</i>	169
6.2.1.	Grundcharakteristiken von Solarzellen und Diodeneigenschaften	169
6.2.2.	Grenzflächen im Halbleiter	170
6.2.2.1.	Gleichgewichts- und Nichtgleichgewichtsladungsträger in Halbleitern	170
6.2.2.2.	Dotierung von Halbleitern	172
6.2.2.3.	Grenzflächen im Halbleiter	176
6.2.3.	Diodendunkelstrom	180

6.2.3.1.	Ladungsträgerverteilung und Ströme im pn-Übergang	180
6.2.3.2.	Strom-Spannungs-Charakteristik der idealen pn-Diode	184
6.2.3.3.	Strom-Spannungs-Charakteristik der Diode mit Rekombination in der Barrierenschicht	185
6.2.4.	Diodenfotostrom	189
6.2.4.1.	Absorption von Licht und Photoeffekt	189
6.2.4.2.	Konzentrationsverteilung der Fotostromträger (kurzgeschlossene Solarzelle, monochromatisches Licht)	190
6.2.4.3.	Fotoströme für monochromatisches Licht (kurzgeschlossene Solarzelle)	194
6.2.4.4.	Strom-Spannungs-Charakteristik der belichteten Solarzelle	198
6.2.4.5.	Spektrale Empfindlichkeit	198
6.2.4.6.	Kurzschlußstrom (Diodenfotostrom).	201
6.3.	<i>Wirkungsgrad und Verlustmechanismen</i>	202
6.3.1.	Wirkungsgrad der idealen Solarzelle	202
6.3.2.	Verlustquellen und reale Solarzellen	205
6.4.	<i>Andere Solarzellenanordnungen</i>	207
6.4.1.	SCHOTTKY-Barrieren-Solarzellen	207
6.4.2.	Metall-Isolator-Halbleiter- (MIS-) und Halbleiter-Isolator- Halbleiter- (SIS-) Solarzellen	210
6.4.3.	Solarzellen auf der Basis von Heteroübergängen	216
6.4.4.	Vertikale Multi-Junction-Solarzellen.	219
6.4.5.	Gitter-Solarzellen	220



7.	Solarzellen, Solarzellentechnologie und Entwicklungstendenzen	221
7.1.	<i>Allgemeine Probleme der Solarzellenentwicklung</i>	221
7.2.	<i>Si-Solarzellen</i>	223
7.2.1.	pn-Solarzelle aus einkristallinem Silicium	223
7.2.2.	Einkristalline Silicium-SCHOTTKY-Barrieren-, MIS- und SIS- Solarzellen	224
7.2.3.	Kristalline Si-Solarzellen für terrestrische Anwendungen	237
7.3.	<i>GaAs-Solarzellen</i>	242
7.4.	<i>Dünnschichtsolarzellen</i>	247
7.4.1.	Cu ₂ S/CdS-Solarzelle und Solarzellen auf der Basis von A ² B ⁶ - Verbindungen	248
7.4.2.	Solarzellen aus amorphem Silicium (a-Si)	251
7.5.	<i>Weitere Solarzellen</i>	255
7.6.	<i>Temperatur, Intensität und Zellendicke</i>	255



8.	Solarelektrische Systeme und Anwendungen	261
8.1.	<i>Fotovoltaischer Generator</i>	261
8.1.1.	Solarzellenmodul und -panel	261
8.1.1.1.	Kontaktintegrierte Solarzelle — Grundbaustein des Moduls	261
8.1.1.2.	Elektrischer Aufbau von Solarzellenmoduln (-panels)	262

8.1.1.3.	Elektrische Verbindungen und mechanischer Aufbau von Solarzellenmoduln und -panels	267
8.1.2.	Generator	274
8.2.	<i>Solarelektrische Anlagen</i>	275
8.2.1.	Solargeneratoren in elektrischen Anlagen	275
8.2.2.	Solargeneratoren in Verbindung mit elektrochemischen Ener- giespeichern	275
8.2.3.	Energietransfer aus Solargeneratoren und Impedanzwandler	282
8.2.4.	Autonome solarelektrische Anlagen	286
8.2.4.1.	Autonomiebedingung und Energiebilanzen in solarelektrischen Anlagen	286
8.2.4.2.	Auslegung des Solargenerators (Anlagen ohne Energiespeicher)	287
8.2.4.3.	Auslegung autonomer Anlagen mit Energiespeicherung	288
8.3.	<i>Anwendungen</i>	299
8.3.1.	Terrestrische Anwendungen	299
8.3.1.1.	Kleinstanwendungen	299
8.3.1.2.	Anwendungen im Bereich kleiner und mittlerer Leistungen	299
8.3.2.	Solargeneratoren in Raumflugkörpern	301
8.3.3.	Probleme bei der großtechnischen Nutzung der fotovoltaischen Energieumwandlung	303

LV

Literaturverzeichnis	305
--------------------------------	-----

SV

Sachwortverzeichnis	318
-------------------------------	-----