

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>17</b>
1.1	Einleitung .....	17
1.1.1	Wozu Photovoltaik? .....	17
1.1.2	Für wen ist dieses Buch gedacht? .....	18
1.1.3	Aufbau des Buches .....	18
1.2	Was ist Energie? .....	19
1.2.1	Definition der Energie .....	19
1.2.2	Einheiten der Energie .....	20
1.2.3	Primär-, Sekundär- und Endenergie .....	21
1.2.4	Energieinhalte verschiedener Stoffe .....	22
1.3	Probleme der heutigen Energieversorgung .....	23
1.3.1	Wachsender Energiebedarf .....	23
1.3.2	Verknappung der Ressourcen .....	24
1.3.3	Klimawandel .....	25
1.3.4	Gefährdung und Entsorgung .....	27
1.4	Erneuerbare Energien .....	27
1.4.1	Die Familie der erneuerbaren Energien .....	27
1.4.2	Vor- und Nachteile von erneuerbaren Energien .....	29
1.5	Photovoltaik – das Wichtigste in Kürze .....	29
1.5.1	Was bedeutet „Photovoltaik“? .....	29
1.5.2	Was sind Solarzellen und Solarmodule? .....	30
1.5.3	Wie ist eine typische Photovoltaikanlage aufgebaut? .....	30
1.5.4	Was „bringt“ eine Photovoltaikanlage? .....	31
1.6	Geschichte der Photovoltaik .....	32
1.6.1	Wie alles begann .....	32
1.6.2	Die ersten echten Solarzellen .....	33
1.6.3	From Space to Earth .....	35
1.6.4	Vom Spielzeug zur Energiequelle .....	35

<b>2</b>	<b>Strahlungsangebot der Sonne</b>	<b>37</b>
2.1	Eigenschaften der Solarstrahlung .....	37
2.1.1	Solarkonstante .....	37
2.1.2	Spektrum der Sonne .....	38
2.1.3	Air Mass .....	39
2.2	Globalstrahlung .....	40
2.2.1	Entstehung der Globalstrahlung .....	40
2.2.2	Beiträge von Diffus- und Direktstrahlung .....	41
2.2.3	Globalstrahlungskarten .....	44
2.3	Berechnung des Sonnenstandes .....	44
2.3.1	Sonnendeklination .....	44
2.3.2	Berechnung der Bahn der Sonne .....	46
2.4	Strahlung auf geneigte Flächen .....	48
2.4.1	Strahlungsberechnung mit dem Dreikomponentenmodell .....	48
2.4.1.1	Direktstrahlung .....	49
2.4.1.2	Diffusstrahlung .....	50
2.4.1.3	Reflektierte Strahlung .....	51
2.4.2	Strahlungsabschätzung mit Diagrammen und Tabellen .....	52
2.4.3	Ertragsgewinn durch Nachführung .....	54
2.5	Strahlungsangebot und Weltenergieverbrauch .....	55
2.5.1	Der Solarstrahlungs-Energiewürfel .....	55
2.5.2	Das Sahara-Wunder .....	56
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Halbleiterphysik</b>	<b>58</b>
3.1	Aufbau von Halbleitern .....	58
3.1.1	Bohrsches Atommodell .....	58
3.1.2	Periodensystem der Elemente .....	60
3.1.3	Aufbau des Siliziumkristalls .....	61
3.1.4	Verbindungshalbleiter .....	61
3.2	Bändermodell des Halbleiters .....	62
3.2.1	Entstehung von Energiebändern .....	62
3.2.2	Unterscheidung in Isolatoren, Halbleiter und Leiter .....	63
3.2.3	Eigenleitungsdichte .....	64
3.3	Ladungstransport in Halbleitern .....	65
3.3.1	Feldströme .....	65
3.3.2	Diffusionsströme .....	67

3.4	Dotierung von Halbleitern .....	68
3.4.1	n-Dotierung .....	68
3.4.2	p-Dotierung .....	69
3.5	Der pn-Übergang .....	69
3.5.1	Prinzipielle Wirkungsweise .....	70
3.5.2	Bänderdiagramm des pn-Übergangs .....	71
3.5.3	Verhalten bei angelegter Spannung .....	73
3.5.4	Dioden-Kennlinie .....	74
3.6	Wechselwirkung von Licht mit Halbleitern .....	75
3.6.1	Phänomen der Lichtabsorption .....	75
3.6.1.1	Absorptionskoeffizient .....	75
3.6.1.2	Direkte und indirekte Halbleiter .....	76
3.6.2	Lichtreflexion an Oberflächen .....	79
3.6.2.1	Reflexionsfaktor .....	79
3.6.2.2	Antireflexbeschichtung .....	80
<b>4</b>	<b>Aufbau und Wirkungsweise der Solarzelle .....</b>	<b>82</b>
4.1	Betrachtung der Photodiode .....	82
4.1.1	Aufbau und Kennlinie .....	82
4.1.2	Ersatzschaltbild .....	83
4.2	Funktionsweise der Solarzelle .....	84
4.2.1	Prinzipieller Aufbau .....	84
4.2.2	Rekombination und Diffusionslänge .....	85
4.2.3	Was passiert in den einzelnen Zellbereichen? .....	86
4.2.4	Back-Surface-Field .....	88
4.3	Photostrom .....	88
4.3.1	Absorptionswirkungsgrad .....	89
4.3.2	Quantenwirkungsgrad .....	90
4.3.3	Spektrale Empfindlichkeit .....	90
4.4	Kennlinie und Kenngrößen .....	91
4.4.1	Kurzschlussstrom $I_K$ .....	92
4.4.2	Leerlaufspannung $U_L$ .....	93
4.4.3	Maximum Power Point (MPP) .....	93
4.4.4	Füllfaktor $FF$ .....	94
4.4.5	Wirkungsgrad $\eta$ .....	94
4.4.6	Temperaturabhängigkeit der Solarzelle .....	94

---

4.5	Elektrische Beschreibung realer Solarzellen .....	97
4.5.1	Vereinfachtes Modell .....	97
4.5.2	Standard-Modell (Ein-Dioden-Modell) .....	97
4.5.3	Zwei-Dioden-Modell .....	98
4.5.4	Bestimmung der Parameter des Ersatzschaltbildes .....	99
4.6	Betrachtungen zum Wirkungsgrad .....	101
4.6.1	Spektraler Wirkungsgrad .....	101
4.6.2	Theoretischer Wirkungsgrad .....	105
4.6.3	Verluste in der realen Solarzelle .....	106
4.6.3.1	Optische Verluste .....	106
4.6.3.2	Elektrische Verluste .....	109
4.7	Hocheffizienzzellen .....	110
4.7.1	Buried-Contact-Zelle .....	110
4.7.2	Punktkontakt-Zelle .....	111
4.7.3	PERL-Zelle .....	111
<b>5</b>	<b>Zellentechnologien .....</b>	<b>113</b>
5.1	Herstellung kristalliner Silizium-Zellen .....	113
5.1.1	Vom Sand zum Silizium .....	113
5.1.1.1	Herstellung von Polysilizium .....	113
5.1.1.2	Herstellung von monokristallinem Silizium .....	115
5.1.1.3	Herstellung von multikristallinem Silizium .....	116
5.1.2	Vom Silizium zum Wafer .....	117
5.1.2.1	Waferherstellung .....	117
5.1.2.2	Wafer aus Foliensilizium .....	117
5.1.3	Herstellung von Standard-Solarzellen .....	119
5.1.4	Herstellung von Solarmodulen .....	121
5.2	Zellen aus amorphem Silizium .....	122
5.2.1	Eigenschaften von amorphem Silizium .....	122
5.2.2	Herstellungsverfahren .....	123
5.2.3	Aufbau der pin-Zelle .....	124
5.2.4	Staebler-Wronski-Effekt .....	125
5.2.5	Stapelzellen .....	127
5.2.6	Kombizellen aus mikromorphem Material .....	128
5.2.7	Integrierte Serienverschaltung .....	129
5.3	Weitere Dünnschichtzellen .....	131
5.3.1	Zellen aus Cadmium-Tellurid .....	131
5.3.2	CIS-Zellen .....	132

---

5.4	Hybride Waferzellen .....	133
5.4.1	Kombination von c-Si und a-Si (HIT-Zelle) .....	133
5.4.2	Stapelzellen aus III/V-Halbleitern .....	134
5.5	Sonstige Zellenkonzepte .....	135
5.6	Konzentratorsysteme .....	136
5.6.1	Prinzip der Strahlungsbündelung .....	136
5.6.2	Was bringt die Konzentration? .....	137
5.6.3	Beispiele von Konzentratorsystemen .....	138
5.6.4	Vor- und Nachteile von Konzentratorsystemen .....	139
5.7	Ökologische Fragestellungen zur Zellen- und Modulherstellung .....	139
5.7.1	Umweltauswirkungen bei Herstellung und Betrieb .....	139
5.7.1.1	Beispiel Cadmium-Tellurid .....	139
5.7.1.2	Beispiel Silizium .....	140
5.7.2	Verfügbarkeit der Materialien .....	141
5.7.2.1	Silizium .....	141
5.7.2.2	Cadmium-Tellurid .....	141
5.7.2.3	CIS .....	141
5.7.2.4	III/V-Halbleiter .....	142
5.7.3	Energierücklaufzeit und Erntefaktor .....	142
5.8	Zusammenfassung .....	145

---

<b>6</b>	<b>Solarmodule und Solargeneratoren .....</b>	<b>148</b>
6.1	Eigenschaften von Solarmodulen .....	148
6.1.1	Solarzellenkennlinie in allen vier Quadranten .....	148
6.1.2	Parallelschaltung von Zellen .....	149
6.1.3	Reihenschaltung von Zellen .....	150
6.1.4	Einsatz von Bypassdioden .....	151
6.1.4.1	Reduzierung von Verschattungsverlusten .....	151
6.1.4.2	Vermeidung von Hotspots .....	153
6.1.5	Typische Kennlinien von Solarmodulen .....	156
6.1.5.1	Variation der Bestrahlungsstärke .....	156
6.1.5.2	Temperaturverhalten .....	157
6.1.6	Sonderfall Dünnschichtmodule .....	158
6.1.7	Beispiele von Datenblattangaben .....	160
6.2	Verschaltung von Solarmodulen .....	161
6.2.1	Parallelschaltung von Strings .....	161
6.2.2	Was passiert bei Verkabelungsfehlern? .....	161

6.2.3	Verluste durch Mismatching .....	162
6.2.4	Schlaue Verschaltung bei Verschattung.....	163
6.3	Gleichstrom-Komponenten .....	164
6.3.1	Prinzipieller Anlagenaufbau.....	164
6.3.2	Gleichstromverkabelung.....	166
6.4	Anlagentypen.....	167
6.4.1	Freilandanlagen .....	168
6.4.2	Flachdachanlagen .....	170
6.4.3	Schrägdachanlagen .....	171
6.4.4	Fassadenanlagen .....	173
<b>7</b>	<b>Photovoltaische Systemtechnik .....</b>	<b>175</b>
7.1	Solargenerator und Last .....	175
7.1.1	Widerstandslast .....	175
7.1.2	DC/DC-Wandler .....	176
7.1.2.1	Idee .....	176
7.1.2.2	Tiefsetzsteller .....	176
7.1.2.3	Hochsetzsteller .....	179
7.1.3	MPP-Tracker .....	181
7.2	Netzgekoppelte Systeme.....	182
7.2.1	Einspeisevarianten .....	182
7.2.2	Anlagenkonzepte .....	182
7.2.3	Aufbau von Wechselrichtern .....	184
7.2.3.1	Aufgaben des Wechselrichters .....	184
7.2.3.2	Netzgeführte und selbstgeführte Wechselrichter .....	184
7.2.3.3	Trafoloser Wechselrichter .....	185
7.2.3.4	Wechselrichter mit Netztrafo .....	187
7.2.3.5	Wechselrichter mit HF-Trafo .....	188
7.2.3.6	Dreiphasige Einspeisung .....	188
7.2.3.7	Weitere schlaue Konzepte .....	190
7.2.4	Wirkungsgrad von Wechselrichtern .....	191
7.2.4.1	Umwandlungswirkungsgrad .....	191
7.2.4.2	Europäischer Wirkungsgrad .....	193
7.2.4.3	Schlaues MPP-Tracking .....	194
7.2.5	Dimensionierung von Wechselrichtern .....	195
7.2.5.1	Leistungsdimensionierung .....	195
7.2.5.2	Spannungsdimensionierung .....	196
7.2.5.3	Stromdimensionierung .....	197

7.2.6	Maßnahmen zur Erhöhung des Eigenverbrauchs .....	197
7.2.7	Anforderungen der Netzbetreiber .....	199
7.2.7.1	Vermeidung von Inselbetrieb .....	199
7.2.7.2	Maximale Einspeiseleistung .....	200
7.2.7.3	Blindleistungsbereitstellung .....	201
7.2.8	Sicherheitsaspekte .....	201
7.2.8.1	Erdung des Generators und Blitzschutz .....	201
7.2.8.2	Brandschutz .....	202
7.3	Inselsysteme .....	202
7.3.1	Prinzipieller Aufbau .....	203
7.3.2	Akkumulatoren .....	203
7.3.2.1	Prinzip des Blei-Säure-Akkus .....	203
7.3.2.2	Typen von Bleiakkus .....	205
7.3.2.3	Akkukapazität .....	207
7.3.2.4	Spannungsverlauf .....	207
7.3.3	Laderegler .....	208
7.3.3.1	Serienregler .....	208
7.3.3.2	Shuntregler .....	208
7.3.3.3	MPP-Laderegler .....	209
7.3.3.4	Produktbeispiele .....	209
7.3.4	Beispiele von Inselsystemen .....	211
7.3.4.1	Solar Home Systems .....	211
7.3.4.2	Hybridsysteme .....	211
7.3.5	Dimensionierung von Inselanlagen .....	213
7.3.5.1	Erfassung des Stromverbrauchs .....	213
7.3.5.2	Dimensionierung des PV-Generators .....	214
7.3.5.3	Auswahl des Akkus .....	216
<b>8</b>	<b>Photovoltaische Messtechnik .....</b>	<b>218</b>
8.1	Messung solarer Strahlung .....	218
8.1.1	Globalstrahlungssensoren .....	218
8.1.1.1	Pyranometer .....	218
8.1.1.2	Strahlungssensoren aus Solarzellen .....	220
8.1.2	Messung von Direkt- und Diffusstrahlung .....	221
8.2	Leistungsmessung von Solarmodulen .....	222
8.2.1	Aufbau eines Solarmodul-Leistungsprüfstands .....	222
8.2.2	Güteklassen von Modulflashern .....	223
8.2.3	Bestimmung der Modulparameter .....	224

8.3 Peakleistungsmessung vor Ort .....	225
8.3.1 Prinzip der Peakleistungsmessung .....	225
8.3.2 Möglichkeiten und Grenzen des Messprinzips .....	226
8.4 Thermographie-Messtechnik .....	227
8.4.1 Prinzip der Infrarot-Temperaturmessung .....	227
8.4.2 Hell-Thermographie von Solarmodulen .....	228
8.4.3 Dunkel-Thermographie .....	230
8.5 Elektrolumineszenz-Messtechnik .....	231
8.5.1 Messprinzip .....	231
8.5.2 Beispiele von Aufnahmen .....	232
<b>9 Planung und Betrieb netzgekoppelter Anlagen .....</b>	<b>235</b>
9.1 Planung und Dimensionierung .....	235
9.1.1 Standortwahl .....	235
9.1.2 Verschattungen .....	236
9.1.2.1 Verschattungsanalyse .....	236
9.1.2.2 Nahverschattungen .....	237
9.1.2.3 Eigenverschattungen .....	238
9.1.2.4 Optimierte Stringverschaltung .....	240
9.1.3 Anlagendimensionierung mit Simulationsprogrammen .....	240
9.1.3.1 Wechselrichter-Auslegungstools .....	240
9.1.3.2 Simulationsprogramme für Photovoltaikanlagen .....	240
9.2 Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen .....	243
9.2.1 Das Erneuerbare-Energien-Gesetz .....	243
9.2.2 Renditeberechnung .....	243
9.2.2.1 Eingangsgrößen .....	243
9.2.2.2 Amortisationszeit .....	244
9.2.2.3 Objektrendite .....	244
9.2.2.4 Renditeerhöhung durch Eigenverbrauch des Solarstroms .....	246
9.2.2.5 Weitere Einflussgrößen .....	247
9.3 Überwachung, Monitoring und Visualisierung .....	247
9.3.1 Methoden zur Anlagenüberwachung .....	247
9.3.2 Monitoring von PV-Anlagen .....	248
9.3.2.1 Spezifische Erträge .....	248
9.3.2.2 Verluste .....	249
9.3.2.3 Performance Ratio .....	250
9.3.2.4 Konkrete Maßnahmen zum Monitoring .....	250
9.3.3 Visualisierung .....	251

---

9.4 Betriebsergebnisse von konkreten Anlagen .....	252
9.4.1 Schrägdachanlage aus dem Jahre 1996 .....	252
9.4.2 Schrägdachanlage aus dem Jahre 2002 .....	254
9.4.3 Flachdachanlage aus dem Jahre 2008 .....	255
<b>10 Ausblick .....</b>	<b>257</b>
10.1 Potential der Photovoltaik .....	257
10.1.1 Theoretisches Potential .....	257
10.1.2 Technisch nutzbare Strahlungsenergie .....	257
10.1.3 Technisches Stromerzeugungspotential .....	259
10.1.4 Photovoltaik versus Biomasse .....	260
10.2 Effiziente Förderinstrumente .....	261
10.3 Preisentwicklung .....	262
10.4 Überlegungen zur zukünftigen Energieversorgung .....	264
10.4.1 Bisherige Entwicklung der erneuerbaren Energien .....	264
10.4.2 Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien .....	264
10.4.3 Optionen zur Speicherung von elektrischer Energie .....	266
10.4.4 Anforderungen an die Netze .....	269
10.5 Fazit .....	270
<b>1 Übungsaufgaben .....</b>	<b>271</b>
<b>12 Anhang .....</b>	<b>281</b>
12.1 Checkliste zu Planung, Installation und Betrieb einer Photovoltaikanlage .....	281
12.2 Im Buch verwendete Abkürzungen .....	283
12.3 Physikalische Konstanten/Materialparameter .....	284
12.4 Literatur .....	285
12.5 Weiterführende Informationen zur Photovoltaik .....	293
<b>Index .....</b>	<b>295</b>