

<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

## **4 Aufbau und Wirkungsweise der Solarzelle .....** **82**

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

## **5 Zellentechnologien .....113**

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 Serienschaltung .....	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

## **6 Solarmodule und Solargeneratoren .....148**

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

## **7 Photovoltaische Systemtechnik .....175**

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

## **8 Photovoltaische Messtechnik ..... 218**

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

## **9 Planung und Betrieb netzgekoppelter Anlagen .....235**

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

## **10** **Ausblick**.....257

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

## **11** **Übungsaufgaben** .....271

## **12** **Anhang** .....281

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

## **Index**.....295