

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>19</b>
1.1	Einleitung .....	19
1.1.1	Wozu Photovoltaik? .....	19
1.1.2	Für wen ist dieses Buch gedacht? .....	20
1.1.3	Aufbau des Buches .....	20
1.2	Was ist Energie? .....	21
1.2.1	Definition der Energie .....	21
1.2.2	Einheiten der Energie .....	23
1.2.3	Primär-, Sekundär- und Endenergie .....	23
1.2.4	Energieinhalte verschiedener Stoffe .....	24
1.3	Probleme der heutigen Energieversorgung .....	25
1.3.1	Wachsender Energiebedarf .....	25
1.3.2	Verknappung der Ressourcen .....	26
1.3.3	Klimawandel .....	27
1.3.4	Gefährdung und Entsorgung .....	29
1.4	Erneuerbare Energien .....	30
1.4.1	Die Familie der erneuerbaren Energien .....	30
1.4.2	Vor- und Nachteile von erneuerbaren Energien .....	31
1.4.3	Bisherige Entwicklung der erneuerbaren Energien .....	32
1.5	Photovoltaik – das Wichtigste in Kürze .....	32
1.5.1	Was bedeutet „Photovoltaik“? .....	32
1.5.2	Was sind Solarzellen und Solarmodule? .....	33
1.5.3	Wie ist eine typische Photovoltaikanlage aufgebaut? .....	33
1.5.4	Was „bringt“ eine Photovoltaikanlage? .....	34
1.6	Geschichte der Photovoltaik .....	35
1.6.1	Wie alles begann .....	35
1.6.2	Die ersten echten Solarzellen .....	36
1.6.3	From Space to Earth .....	38
1.6.4	Vom Spielzeug zur Energiequelle .....	38

<b>2</b>	<b>Strahlungsangebot der Sonne</b> .....	<b>41</b>
2.1	Eigenschaften der Solarstrahlung .....	41
2.1.1	Solarkonstante .....	41
2.1.2	Spektrum der Sonne .....	42
2.1.3	Air Mass .....	43
2.2	Globalstrahlung .....	44
2.2.1	Entstehung der Globalstrahlung .....	44
2.2.2	Beiträge von Diffus- und Direktstrahlung .....	45
2.2.3	Globalstrahlungskarten .....	47
2.3	Berechnung des Sonnenstandes .....	48
2.3.1	Sonnendeklination .....	48
2.3.2	Berechnung der Bahn der Sonne .....	51
2.4	Strahlung auf geneigte Flächen .....	53
2.4.1	Strahlungsberechnung mit dem Dreikomponentenmodell .....	53
2.4.1.1	Direktstrahlung .....	54
2.4.1.2	Diffusstrahlung .....	55
2.4.1.3	Reflektierte Strahlung .....	56
2.4.2	Strahlungsabschätzung mit Diagrammen und Tabellen .....	57
2.4.3	Ertragsgewinn durch Nachführung .....	59
2.5	Strahlungsangebot und Weltenergieverbrauch .....	60
2.5.1	Der Solarstrahlungs-Energiewürfel .....	60
2.5.2	Das Sahara-Wunder .....	61
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Halbleiterphysik</b> .....	<b>64</b>
3.1	Aufbau von Halbleitern .....	64
3.1.1	Bohrsches Atommodell .....	64
3.1.2	Periodensystem der Elemente .....	66
3.1.3	Aufbau des Siliziumkristalls .....	67
3.1.4	Verbindungshalbleiter .....	67
3.2	Bändermodell des Halbleiters .....	68
3.2.1	Entstehung von Energiebändern .....	68
3.2.2	Unterscheidung in Isolatoren, Halbleiter und Leiter .....	69
3.2.3	Eigenleitungsichte .....	70
3.3	Ladungstransport in Halbleitern .....	71
3.3.1	Feldströme .....	71
3.3.2	Diffusionsströme .....	73
3.4	Dotierung von Halbleitern .....	74
3.4.1	n-Dotierung .....	74

3.4.2	p-Dotierung .....	75
3.5	Der pn-Übergang .....	75
3.5.1	Prinzipielle Wirkungsweise .....	76
3.5.2	Bänderdiagramm des pn-Übergangs .....	77
3.5.3	Verhalten bei angelegter Spannung .....	79
3.5.4	Dioden-Kennlinie .....	80
3.6	Wechselwirkung von Licht mit Halbleitern .....	81
3.6.1	Phänomen der Lichtabsorption .....	81
3.6.1.1	Absorptionskoeffizient .....	82
3.6.1.2	Direkte und indirekte Halbleiter .....	83
3.6.2	Lichtreflexion an Oberflächen .....	85
3.6.2.1	Reflexionsfaktor .....	85
3.6.2.2	Antireflexbeschichtung .....	86

**4 Aufbau und Wirkungsweise der Solarzelle ..... 90**

4.1	Betrachtung der Photodiode .....	90
4.1.1	Aufbau und Kennlinie .....	90
4.1.2	Ersatzschaltbild .....	91
4.2	Funktionsweise der Solarzelle .....	92
4.2.1	Prinzipieller Aufbau .....	92
4.2.2	Rekombination und Diffusionslänge .....	93
4.2.3	Was passiert in den einzelnen Zellbereichen? .....	94
4.2.4	Back-Surface-Field .....	96
4.3	Photostrom .....	96
4.3.1	Absorptionswirkungsgrad .....	97
4.3.2	Quantenwirkungsgrad .....	98
4.3.3	Spektrale Empfindlichkeit .....	98
4.4	Kennlinie und Kenngrößen .....	99
4.4.1	Kurzschlussstrom $I_K$ .....	101
4.4.2	Leerlaufspannung $U_L$ .....	101
4.4.3	Maximum Power Point (MPP) .....	101
4.4.4	Füllfaktor $FF$ .....	102
4.4.5	Wirkungsgrad $\eta$ .....	102
4.4.6	Temperaturabhängigkeit der Solarzelle .....	103
4.5	Elektrische Beschreibung realer Solarzellen .....	105
4.5.1	Vereinfachtes Modell .....	105
4.5.2	Standard-Modell (Ein-Dioden-Modell) .....	105
4.5.3	Zwei-Dioden-Modell .....	106

4.5.4	Bestimmung der Parameter des Ersatzschaltbildes .....	107
4.6	Betrachtungen zum Wirkungsgrad .....	110
4.6.1	Spektraler Wirkungsgrad .....	110
4.6.2	Theoretischer Wirkungsgrad .....	114
4.6.3	Verluste in der realen Solarzelle .....	115
4.6.3.1	Optische Verluste .....	115
4.6.3.2	Elektrische Verluste .....	118
4.7	Hocheffizienzzellen .....	119
4.7.1	Buried-Contact-Zelle .....	119
4.7.2	Punktkontakt-Zelle (IBC-Zelle) .....	120
4.7.3	PERL- und PERC-Zelle .....	121

## **5 Zellentechnologien .....** 123

5.1	Herstellung kristalliner Silizium-Zellen .....	123
5.1.1	Vom Sand zum Silizium .....	123
5.1.1.1	Herstellung von Polysilizium .....	123
5.1.1.2	Herstellung von monokristallinem Silizium .....	125
5.1.1.3	Herstellung von multikristallinem Silizium .....	126
5.1.1.4	Herstellung von quasimonokristallinem Silizium .....	127
5.1.2	Vom Silizium zum Wafer .....	127
5.1.2.1	Waferherstellung .....	127
5.1.2.2	Wafer aus Foliensilizium .....	128
5.1.3	Herstellung von Standard-Solarzellen .....	129
5.1.4	Herstellung von Solarmodulen .....	131
5.2	Zellen aus amorphem Silizium .....	133
5.2.1	Eigenschaften von amorphem Silizium .....	133
5.2.2	Herstellungsverfahren .....	134
5.2.3	Aufbau der pin-Zelle .....	135
5.2.4	Staebler-Wronski-Effekt .....	136
5.2.5	Stapelzellen .....	138
5.2.6	Kombizellen aus mikromorphem Material .....	139
5.2.7	Integrierte Serienverschaltung .....	140
5.3	Weitere Dünnschichtzellen .....	142
5.3.1	CIS-Zellen .....	142
5.3.2	Zellen aus Cadmium-Tellurid .....	145
5.4	Hybride Waferzellen .....	147
5.4.1	Kombination von c-Si und a-Si (HIT-Zelle) .....	148
5.4.2	Stapelzellen aus III/V-Halbleitern .....	149

5.5	Sonstige Zellenkonzepte .....	149
5.5.1	Farbstoffsolarzelle .....	150
5.5.2	Organische Solarzelle .....	150
5.5.3	Perowskit-Solarzelle .....	151
5.6	Konzentratorsysteme.....	151
5.6.1	Prinzip der Strahlungsbündelung .....	151
5.6.2	Was bringt die Konzentration? .....	152
5.6.3	Beispiele von Konzentratorsystemen .....	153
5.6.4	Vor- und Nachteile von Konzentratorsystemen .....	154
5.7	Ökologische Fragestellungen zur Zellen- und Modulherstellung.....	154
5.7.1	Umweltauswirkungen bei Herstellung und Betrieb.....	154
5.7.1.1	Beispiel Cadmium-Tellurid .....	155
5.7.1.2	Beispiel Silizium .....	155
5.7.2	Verfügbarkeit der Materialien .....	156
5.7.2.1	Silizium .....	156
5.7.2.2	Cadmium-Tellurid .....	156
5.7.2.3	CIS.....	157
5.7.2.4	III/V-Halbleiter .....	158
5.7.3	Energierücklaufzeit und Erntefaktor .....	158
5.8	Zusammenfassung .....	161

**6 Solarmodule und Solargeneratoren ..... 164**

6.1	Eigenschaften von Solarmodulen .....	164
6.1.1	Solarzellenkennlinie in allen vier Quadranten.....	164
6.1.2	Parallelschaltung von Zellen .....	165
6.1.3	Reihenschaltung von Zellen .....	166
6.1.4	Einsatz von Bypassdioden .....	167
6.1.4.1	Reduzierung von Verschattungsverlusten .....	167
6.1.4.2	Vermeidung von Hotspots .....	169
6.1.5	Typische Kennlinien von Solarmodulen.....	172
6.1.5.1	Variation der Bestrahlungsstärke .....	172
6.1.5.2	Temperaturverhalten .....	173
6.1.6	Sonderfall Dünnschichtmodule .....	174
6.1.7	Beispiele von Datenblattangaben .....	176
6.2	Verschaltung von Solarmodulen.....	177
6.2.1	Parallelschaltung von Strings.....	177
6.2.2	Was passiert bei Verkabelungsfehlern? .....	177
6.2.3	Verluste durch Mismatching .....	178

6.2.4	Schlaue Verschaltung bei Verschattung .....	179
6.3	Gleichstrom-Komponenten .....	181
6.3.1	Prinzipieller Anlagenaufbau .....	181
6.3.2	Gleichstromverkabelung .....	182
6.4	Anlagentypen .....	184
6.4.1	Freilandanlagen .....	185
6.4.2	Flachdachanlagen .....	187
6.4.3	Schrägdachanlagen .....	188
6.4.4	Fassadenanlagen .....	190
6.4.5	Schwimmende Anlagen .....	191
<b>7</b>	<b>Systemtechnik netzgekoppelter Anlagen .....</b>	<b>193</b>
7.1	Solargenerator und Last .....	193
7.1.1	Widerstandslast .....	193
7.1.2	DC/DC-Wandler .....	194
7.1.2.1	Idee .....	194
7.1.2.2	Tiefsetzsteller .....	195
7.1.2.3	Hochsetzsteller .....	197
7.1.3	MPP-Tracker .....	199
7.2	Aufbau netzgekoppelter Anlagen .....	200
7.2.1	Einspeisevarianten .....	200
7.2.2	Anlagenkonzepte .....	201
7.3	Aufbau von Wechselrichtern .....	203
7.3.1	Aufgaben des Wechselrichters .....	203
7.3.2	Netzgeführte und selbstgeführte Wechselrichter .....	203
7.3.3	Trafoloser Wechselrichter .....	204
7.3.4	Wechselrichter mit Netztrafo .....	206
7.3.5	Wechselrichter mit HF-Trafo .....	206
7.3.6	Dreiphasige Einspeisung .....	208
7.3.7	Weitere schlaue Konzepte .....	209
7.4	Wirkungsgrad von Wechselrichtern .....	210
7.4.1	Umwandlungswirkungsgrad .....	210
7.4.2	Europäischer Wirkungsgrad .....	212
7.4.3	Gesamtwirkungsgrad .....	214
7.4.4	Schlaues MPP-Tracking .....	214
7.5	Dimensionierung von Wechselrichtern .....	214
7.5.1	Leistungsdimensionierung .....	214
7.5.2	Spannungsdimensionierung .....	216

7.5.3	Stromdimensionierung .....	217
7.6	Anforderungen der Netzbetreiber .....	217
7.6.1	Vermeidung von Inselbetrieb .....	217
7.6.2	Maximale Einspeiseleistung .....	219
7.6.3	Blindleistungsbereitstellung .....	220
7.7	Sicherheitsaspekte .....	223
7.7.1	Erdung des Generators und Blitzschutz .....	223
7.7.2	Brandschutz .....	223

**8 Speicherung von Solarstrom ..... 225**

8.1	Prinzip der Solarstromspeicherung .....	225
8.2	Akkumulatoren .....	226
8.2.1	Blei-Säure-Batterie .....	227
8.2.1.1	Prinzip und Aufbau .....	227
8.2.1.2	Typen von Bleiakkus .....	229
8.2.1.3	Akkukapazität .....	231
8.2.1.4	Spannungsverlauf .....	232
8.2.1.5	Fazit .....	232
8.2.2	Laderegler .....	232
8.2.2.1	Serienregler .....	233
8.2.2.2	Shuntregler .....	233
8.2.2.3	MPP-Laderegler .....	234
8.2.2.4	Produktbeispiele .....	234
8.2.3	Lithium-Ionen-Batterie .....	235
8.2.3.1	Prinzip und Aufbau .....	236
8.2.3.2	Reaktionen beim Lade- und Entladevorgang .....	237
8.2.3.3	Materialkombinationen und Zellspannung .....	238
8.2.3.4	Sicherheitsaspekte .....	239
8.2.3.5	Ladeverfahren .....	239
8.2.3.6	Bauformen .....	240
8.2.3.7	Lebensdauer .....	241
8.2.3.8	Einsatzbereiche .....	242
8.2.3.9	Fazit .....	242
8.2.4	Natrium-Schwefel-Batterie .....	242
8.2.4.1	Prinzip und Aufbau .....	242
8.2.4.2	Besonderheiten der Hochtemperatur-Batterie .....	243
8.2.4.3	Natrium-Schwefel-Batterien in der Praxis .....	244
8.2.4.4	Fazit .....	245

8.2.5	Redox-Flow-Batterie .....	245
8.2.5.1	Prinzip und Aufbau .....	245
8.2.5.2	Verhalten im praktischen Einsatz .....	248
8.2.5.3	Konkrete Anwendungen .....	249
8.2.5.4	Fazit .....	249
8.2.6	Vergleich der verschiedenen Batterietypen .....	250
8.3	Speichereinsatz zur Erhöhung des Eigenverbrauchs .....	251
8.3.1	Eigenverbrauch in Privathaushalten .....	251
8.3.1.1	Lösung ohne Speicher .....	251
8.3.1.2	Lösung mit Speicher .....	252
8.3.1.3	Beispiele von Speichersystemen .....	253
8.3.1.4	Was kostet die Speicherung einer Kilowattstunde? .....	255
8.3.1.5	Das Smart Home .....	256
8.3.2	Eigenverbrauch in Gewerbebetrieben .....	257
8.3.2.1	Beispiel Produktionsbetrieb .....	257
8.3.2.2	Beispiel Krankenhaus .....	258
8.4	Speichereinsatz aus Sicht des Netzes .....	258
8.4.1	Peak-Shaving durch Speicher .....	259
8.4.2	Marktanreizprogramm für Solarspeicher .....	259
8.5	Inselsysteme .....	262
8.5.1	Prinzipieller Aufbau .....	262
8.5.2	Beispiele von Inselsystemen .....	263
8.5.2.1	Solar Home Systems .....	263
8.5.2.2	Hybridsysteme .....	264
8.5.3	Dimensionierung von Inselanlagen .....	266
8.5.3.1	Erfassung des Stromverbrauchs .....	266
8.5.3.2	Dimensionierung des PV-Generators .....	266
8.5.3.3	Auswahl des Akkus .....	269
<b>9</b>	<b>Photovoltaische Messtechnik .....</b>	<b>271</b>
9.1	Messung solarer Strahlung .....	271
9.1.1	Globalstrahlungssensoren .....	271
9.1.1.1	Pyranometer .....	271
9.1.1.2	Strahlungssensoren aus Solarzellen .....	273
9.1.2	Messung von Direkt- und Diffusstrahlung .....	274
9.2	Leistungsmessung von Solarmodulen .....	275
9.2.1	Aufbau eines Solarmodul-Leistungsprüfstands .....	275
9.2.2	Güteklassen von Modulflashern .....	276



9.2.3 Bestimmung der Modulparameter .....	277
9.3 Peakleistungsmessung vor Ort .....	278
9.3.1 Prinzip der Peakleistungsmessung .....	278
9.3.2 Möglichkeiten und Grenzen des Messprinzips .....	279
9.4 Thermographie-Messtechnik .....	280
9.4.1 Prinzip der Infrarot-Temperaturmessung .....	280
9.4.2 Hell-Thermographie von Solarmodulen .....	281
9.4.3 Dunkel-Thermographie .....	283
9.5 Elektrolumineszenz-Messtechnik .....	284
9.5.1 Messprinzip .....	284
9.5.2 Beispiele von Aufnahmen .....	285
9.5.3 LowCost-Outdoor-Elektrolumineszenz-Untersuchungen .....	288
9.6 Untersuchungen zur spannungsinduzierten Degradation (PID) .....	290
9.6.1 Erklärung des PID-Effektes .....	291
9.6.2 Prüfung von Modulen auf PID .....	292
9.6.3 EL-Untersuchungen zu PID .....	294
9.7 String-Dunkelkennlinien-Technik .....	295
9.7.1 Motivation .....	295
9.7.2 Messmethode .....	296
9.7.3 Detektion von PID .....	296
9.7.4 Detektion von defekten Bypassdioden und Zellverbindern .....	297
9.7.5 Fazit .....	300

## **10**

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

## **301**

10.1 Planung und Dimensionierung .....	301
10.1.1 Standortwahl .....	301
10.1.2 Verschattungen .....	302
10.1.2.1 Verschattungsanalyse .....	302
10.1.2.2 Nahverschattungen .....	303
10.1.2.3 Eigenverschattungen .....	305
10.1.2.4 Optimierte Stringverschaltung .....	306
10.1.3 Anlagendimensionierung mit Simulationsprogrammen .....	306
10.1.3.1 Wechselrichter-Auslegungstools .....	306
10.1.3.2 Simulationsprogramme für Photovoltaikanlagen .....	306
10.2 Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen .....	309
10.2.1 Das Erneuerbare-Energien-Gesetz .....	309
10.2.2 Renditeberechnung .....	309
10.2.2.1 Eingangsgrößen .....	310

10.2.2.2	Amortisationszeit .....	310
10.2.2.3	Objektrendite .....	311
10.2.2.4	Renditeerhöhung durch Eigenverbrauch des Solarstroms .....	313
10.2.2.5	Weitere Einflussgrößen .....	313
10.3	Überwachung, Monitoring und Visualisierung .....	314
10.3.1	Methoden zur Anlagenüberwachung .....	314
10.3.2	Monitoring von PV-Anlagen .....	314
10.3.2.1	Spezifische Erträge .....	314
10.3.2.2	Verluste .....	316
10.3.2.3	Performance Ratio .....	316
10.3.2.4	Konkrete Maßnahmen zum Monitoring .....	317
10.3.3	Visualisierung .....	317
10.4	Betriebsergebnisse von konkreten Anlagen .....	318
10.4.1	Schrägdachanlage aus dem Jahre 1996 .....	318
10.4.2	Schrägdachanlage aus dem Jahre 2002 .....	320
10.4.3	Flachdachanlage aus dem Jahre 2008 .....	321
<b>11</b>	<b>Zukünftige Entwicklung .....</b>	<b>323</b>
11.1	Potential der Photovoltaik .....	323
11.1.1	Theoretisches Potential .....	323
11.1.2	Technisch nutzbare Strahlungsenergie .....	323
11.1.3	Technisches Stromerzeugungspotential .....	325
11.1.4	Photovoltaik versus Biomasse .....	326
11.2	Effiziente Förderinstrumente .....	327
11.3	Preis- und Vergütungsentwicklung .....	328
11.3.1	Preisentwicklung von Solarmodulen .....	328
11.3.2	Entwicklung der Einspeisevergütung .....	330
11.4	Erneuerbare Energien im heutigen Stromversorgungssystem .....	331
11.4.1	Struktur der Stromerzeugung .....	331
11.4.2	Kraftwerksarten und Regelenergie .....	332
11.4.3	Zusammenspiel aus Sonne und Wind .....	333
11.4.4	Exemplarische Stromproduktionsverläufe .....	334
11.5	Überlegungen zur zukünftigen Energieversorgung .....	337
11.5.1	Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien .....	337
11.5.2	Optionen zur Speicherung von elektrischer Energie .....	341
11.5.2.1	Pumpspeicherwerke .....	341
11.5.2.2	Druckluftspeicher .....	341
11.5.2.3	Batteriespeicherung .....	342

11.5.2.4 Elektromobilität .....	342
11.5.2.5 Wasserstoff als Speicher .....	342
11.5.2.6 Power-to-Gas: Methanisierung .....	343
11.5.3 Alternativen zur Speicherung .....	344
11.5.3.1 Aktives Lastmanagement durch Smart Grids .....	344
11.5.3.2 Ausbau des Stromnetzes .....	344
11.5.3.3 Begrenzung der Einspeiseleistung .....	344
11.5.3.4 Einsatz flexibler Kraftwerke .....	345
11.6 Fazit .....	345
<b>12 Übungsaufgaben .....</b>	<b>346</b>
<b>13 Anhang .....</b>	<b>357</b>
13.1 Einfluss von Ausrichtung und Neigung auf die Jahresstrahlungssumme an verschiedenen Standorten .....	357
13.1.1 Standort Hamburg .....	358
13.1.2 Standort München .....	359
13.1.3 Standort Bern .....	360
13.1.4 Standort Wien .....	361
13.1.5 Standort Marseille .....	362
13.1.6 Standort Kairo .....	363
13.2 Checkliste zu Planung, Installation und Betrieb einer Photovoltaikanlage .....	364
13.3 Im Buch verwendete Abkürzungen .....	366
13.4 Physikalische Konstanten/Materialparameter .....	367
<b>Literatur .....</b>	<b>369</b>
<b>Index .....</b>	<b>379</b>