

Inhalt

1	Einführung	19
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

2	Strahlungsangebot der Sonne	41
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
3	Grundlagen der Halbleiterphysik	64
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	Eigenleitungsdichte	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 η	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 Serienschaltung	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

7 Systemtechnik netzgekoppelter Anlagen 193

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
9	Photovoltaische Messtechnik	271
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

11 Zukünftige Entwicklung..... 323

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 Regelernergie	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
12 Übungsaufgaben	346
13 Anhang	357
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
Literatur	369
Index	379