

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	50
2.3.1	Sonnendeklination	50
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	81
3.6.1.2 Direkte und indirekte Halbleiter	82
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	88
4.1 Betrachtung der Photodiode	88
4.1.1 Aufbau und Kennlinie	88
4.1.2 Ersatzschaltbild	89
4.2 Funktionsweise der Solarzelle	90
4.2.1 Prinzipieller Aufbau	90
4.2.2 Rekombination und Diffusionslänge	91
4.2.3 Was passiert in den einzelnen Zellbereichen?	92
4.2.4 Back-Surface-Field	94
4.3 Photostrom	94
4.3.1 Absorptionswirkungsgrad	95
4.3.2 Quantenwirkungsgrad	96
4.3.3 Spektrale Empfindlichkeit	96
4.4 Kennlinie und Kenngrößen	97
4.4.1 Kurzschlussstrom I_K	98
4.4.2 Leerlaufspannung U_L	99
4.4.3 Maximum Power Point (MPP)	99
4.4.4 Füllfaktor 'FF'	100
4.4.5 Wirkungsgrad η	100
4.4.6 Temperaturabhängigkeit der Solarzelle	100
4.5 Elektrische Beschreibung realer Solarzellen	103
4.5.1 Vereinfachtes Modell	103
4.5.2 Standard-Modell (Ein-Dioden-Modell)	103
4.5.3 Zwei-Dioden-Modell	104

4.5.4 Bestimmung der Parameter des Ersatzschaltbildes	105
4.6 Betrachtungen zum Wirkungsgrad	108
4.6.1 Spektraler Wirkungsgrad	108
4.6.2 Theoretischer Wirkungsgrad	112
4.6.3 Verluste in der realen Solarzelle	113
4.6.3.1 Optische Verluste	113
4.6.3.2 Elektrische Verluste	116
4.7 Hocheffizienzzellen	117
4.7.1 Buried-Contact-Zelle	117
4.7.2 Punktkontakt-Zelle (IBC-Zelle)	118
4.7.3 PERL-Zelle	119
5 Zellentechnologien	121
5.1 Herstellung kristalliner Silizium-Zellen	121
5.1.1 Vom Sand zum Silizium	121
5.1.1.1 Herstellung von Polysilizium	121
5.1.1.2 Herstellung von monokristallinem Silizium	123
5.1.1.3 Herstellung von multikristallinem Silizium	124
5.1.1.4 Herstellung von quasimonokristallinem Silizium	125
5.1.2 Vom Silizium zum Wafer	125
5.1.2.1 Waferherstellung	125
5.1.2.2 Wafer aus Foliensilizium	126
5.1.3 Herstellung von Standard-Solarzellen	127
5.1.4 Herstellung von Solarmodulen	129
5.2 Zellen aus amorphem Silizium	131
5.2.1 Eigenschaften von amorphem Silizium	131
5.2.2 Herstellungsverfahren	132
5.2.3 Aufbau der pin-Zelle	132
5.2.4 Staebler-Wronski-Effekt	134
5.2.5 Stapelzellen	135
5.2.6 Kombizellen aus mikromorphem Material	137
5.2.7 Integrierte Serienverschaltung	138
5.3 Weitere Dünnschichtzellen	139
5.3.1 Zellen aus Cadmium-Tellurid	139
5.3.2 CIS-Zellen	140
5.4 Hybride Waferzellen	142
5.4.1 Kombination von c-Si und a-Si (HIT-Zelle)	142
5.4.2 Stapelzellen aus III/V-Halbleitern	143

5.5	Sonstige Zellenkonzepte	144
5.6	Konzentratorsysteme	145
5.6.1	Prinzip der Strahlungsbündelung	145
5.6.2	Was bringt die Konzentration?	146
5.6.3	Beispiele von Konzentratorsystemen	147
5.6.4	Vor- und Nachteile von Konzentratorsystemen	148
5.7	Ökologische Fragestellungen zur Zellen- und Modulherstellung	148
5.7.1	Umweltauswirkungen bei Herstellung und Betrieb	148
5.7.1.1	Beispiel Cadmium-Tellurid	148
5.7.1.2	Beispiel Silizium	149
5.7.2	Verfügbarkeit der Materialien	150
5.7.2.1	Silizium	150
5.7.2.2	Cadmium-Tellurid	150
5.7.2.3	CIS	151
5.7.2.4	III/V-Halbleiter	151
5.7.3	Energierücklaufzeit und Erntefaktor	152
5.8	Zusammenfassung	155
6	Solarmodule und Solargeneratoren	158
6.1	Eigenschaften von Solarmodulen	158
6.1.1	Solarzellenkennlinie in allen vier Quadranten	158
6.1.2	Parallelschaltung von Zellen	159
6.1.3	Reihenschaltung von Zellen	160
6.1.4	Einsatz von Bypassdioden	161
6.1.4.1	Reduzierung von Verschattungsverlusten	161
6.1.4.2	Vermeidung von Hotspots	163
6.1.5	Typische Kennlinien von Solarmodulen	166
6.1.5.1	Variation der Bestrahlungsstärke	166
6.1.5.2	Temperaturverhalten	167
6.1.6	Sonderfall Dünnschichtmodule	168
6.1.7	Beispiele von Datenblattangaben	170
6.2	Verschaltung von Solarmodulen	171
6.2.1	Parallelschaltung von Strings	171
6.2.2	Was passiert bei Verkabelungsfehlern?	171
6.2.3	Verluste durch Mismatching	172
6.2.4	Schlaue Verschaltung bei Verschattung	173
6.3	Gleichstrom-Komponenten	175
6.3.1	Prinzipieller Anlagenaufbau	175

6.3.2 Gleichstromverkabelung.....	177
6.4 Anlagentypen.....	178
6.4.1 Freilandanlagen.....	179
6.4.2 Flachdachanlagen	181
6.4.3 Schrägdachanlagen	182
6.4.4 Fassadenanlagen	184
7 Systemtechnik netzgekoppelter Anlagen	186
7.1 Solargenerator und Last	186
7.1.1 Widerstandslast	186
7.1.2 DC/DC-Wandler	187
7.1.2.1 Idee	187
7.1.2.2 Tiefsetzsteller	188
7.1.2.3 Hochsetzsteller	190
7.1.3 MPP-Tracker	192
7.2 Aufbau netzgekoppelter Anlagen	193
7.2.1 Einspeisevarianten	193
7.2.2 Anlagenkonzepte	194
7.3 Aufbau von Wechselrichtern	196
7.3.1 Aufgaben des Wechselrichters	196
7.3.2 Netzgeführte und selbstgeführte Wechselrichter.....	196
7.3.3 Trafoloser Wechselrichter.....	197
7.3.4 Wechselrichter mit Netztrafo	199
7.3.5 Wechselrichter mit HF-Trafo	199
7.3.6 Dreiphasige Einspeisung.....	201
7.3.7 Weitere schlaue Konzepte	202
7.4 Wirkungsgrad von Wechselrichtern	203
7.4.1 Umwandlungswirkungsgrad	203
7.4.2 Europäischer Wirkungsgrad	205
7.4.3 Schlaues MPP-Tracking	207
7.5 Dimensionierung von Wechselrichtern	207
7.5.1 Leistungsdimensionierung	207
7.5.2 Spannungsdimensionierung	208
7.5.3 Stromdimensionierung	209
7.6 Anforderungen der Netzbetreiber	210
7.6.1 Vermeidung von Inselbetrieb	210
7.6.2 Maximale Einspeiseleistung.....	212
7.6.3 Blindleistungsbereitstellung.....	212

7.7 Sicherheitsaspekte	215
7.7.1 Erdung des Generators und Blitzschutz	215
7.7.2 Brandschutz	216
8 Speicherung von Solarstrom	217
8.1 Prinzip der Solarstromspeicherung	217
8.2 Akkumulatoren	218
8.2.1 Blei-Säure-Batterie	219
8.2.1.1 Prinzip und Aufbau	219
8.2.1.2 Typen von Bleiakkus	221
8.2.1.3 Akkukapazität	223
8.2.1.4 Spannungsverlauf	224
8.2.1.5 Fazit	224
8.2.2 Laderegler	224
8.2.2.1 Serienregler	225
8.2.2.2 Shuntregler	225
8.2.2.3 MPP-Laderegler	226
8.2.2.4 Produktbeispiele	226
8.2.3 Lithium-Ionen-Batterie	227
8.2.3.1 Prinzip und Aufbau	228
8.2.3.2 Reaktionen beim Lade- und Entladevorgang	229
8.2.3.3 Materialkombinationen und Zellspannung	230
8.2.3.4 Sicherheitsaspekte	231
8.2.3.5 Ladeverfahren	231
8.2.3.6 Bauformen	232
8.2.3.7 Lebensdauer	233
8.2.3.8 Einsatzbereiche	234
8.2.3.9 Fazit	234
8.2.4 Natrium-Schwefel-Batterie	234
8.2.4.1 Prinzip und Aufbau	234
8.2.4.2 Besonderheiten der Hochtemperatur-Batterie	235
8.2.4.3 Natrium-Schwefel-Batterien in der Praxis	236
8.2.4.4 Fazit	237
8.2.5 Redox-Flow-Batterie	237
8.2.5.1 Prinzip und Aufbau	237
8.2.5.2 Verhalten im praktischen Einsatz	240
8.2.5.3 Konkrete Anwendungen	241
8.2.5.4 Fazit	241

8.2.6	Vergleich der verschiedenen Batterietypen	242
8.3	Speichereinsatz zur Erhöhung des Eigenverbrauchs	243
8.3.1	Eigenverbrauch in Privathaushalten	243
8.3.1.1	Lösung ohne Speicher	243
8.3.1.2	Lösung mit Speicher	244
8.3.1.3	Beispiele von Speichersystemen	245
8.3.1.4	Was kostet die Speicherung einer Kilowattstunde?	245
8.3.1.5	Das Smart Home	248
8.3.2	Eigenverbrauch in Gewerbebetrieben	249
8.3.2.1	Beispiel Produktionsbetrieb	249
8.3.2.2	Beispiel Krankenhaus	249
8.4	Speichereinsatz aus Sicht des Netzes	250
8.4.1	Peak-Shaving durch Speicher	251
8.4.2	Marktanreizprogramm für Solarspeicher	251
8.5	Inselsysteme	254
8.5.1	Prinzipieller Aufbau	254
8.5.2	Beispiele von Inselsystemen	255
8.5.2.1	Solar Home Systems	255
8.5.2.2	Hybridsysteme	256
8.5.3	Dimensionierung von Inselanlagen	257
8.5.3.1	Erfassung des Stromverbrauchs	258
8.5.3.2	Dimensionierung des PV-Generators	258
8.5.3.3	Auswahl des Akkus	260
9	Photovoltaische Messtechnik	263
9.1	Messung solarer Strahlung	263
9.1.1	Globalstrahlungssensoren	263
9.1.1.1	Pyranometer	263
9.1.1.2	Strahlungssensoren aus Solarzellen	265
9.1.2	Messung von Direkt- und Diffusstrahlung	266
9.2	Leistungsmessung von Solarmodulen	267
9.2.1	Aufbau eines Solarmodul-Leistungsprüfstands	267
9.2.2	Güteklassen von Modulflashern	268
9.2.3	Bestimmung der Modulparameter	269
9.3	Peakleistungsmessung vor Ort	270
9.3.1	Prinzip der Peakleistungsmessung	270
9.3.2	Möglichkeiten und Grenzen des Messprinzips	271
9.4	Thermographie-Messtechnik	272

9.4.1 Prinzip der Infrarot-Temperaturmessung	272
9.4.2 Hell-Thermographie von Solarmodulen.....	273
9.4.3 Dunkel-Thermographie.....	275
9.5 Elektrolumineszenz-Messtechnik	276
9.5.1 Messprinzip.....	276
9.5.2 Beispiele von Aufnahmen.....	277
9.5.3 LowCost-Outdoor-Elektrolumineszenz-Untersuchungen	279
9.6 Untersuchungen zur spannungsinduzierten Degradation (PID)	282
9.6.1 Erklärung des PID-Effektes	282
9.6.2 Prüfung von Modulen auf PID	284
9.6.3 EL-Untersuchungen zu PID	285
10 Planung und Betrieb netzgekoppelter Anlagen	287
10.1 Planung und Dimensionierung	287
10.1.1 Standortwahl	287
10.1.2 Verschattungen.....	288
10.1.2.1 Verschattungsanalyse.....	288
10.1.2.2 Nahverschattungen	289
10.1.2.3 Eigenverschattungen	290
10.1.2.4 Optimierte Stringverschaltung	292
10.1.3 Anlagendimensionierung mit Simulationsprogrammen.....	292
10.1.3.1 Wechselrichter-Auslegungstools	292
10.1.3.2 Simulationsprogramme für Photovoltaikanlagen	292
10.2 Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen	295
10.2.1 Das Erneuerbare-Energien-Gesetz	295
10.2.2 Renditeberechnung.....	295
10.2.2.1 Eingangsgrößen	296
10.2.2.2 Amortisationszeit.....	296
10.2.2.3 Objektrendite	297
10.2.2.4 Renditeerhöhung durch Eigenverbrauch des Solarstroms	299
10.2.2.5 Weitere Einflussgrößen	299
10.3 Überwachung, Monitoring und Visualisierung	300
10.3.1 Methoden zur Anlagenüberwachung	300
10.3.2 Monitoring von PV-Anlagen	300
10.3.2.1 Spezifische Erträge	300
10.3.2.2 Verluste	302
10.3.2.3 Performance Ratio	302
10.3.2.4 Konkrete Maßnahmen zum Monitoring	303

10.3.3 Visualisierung	303
10.4 Betriebsergebnisse von konkreten Anlagen	304
10.4.1 Schrägdachanlage aus dem Jahre 1996	304
10.4.2 Schrägdachanlage aus dem Jahre 2002	306
10.4.3 Flachdachanlage aus dem Jahre 2008	307
11 Zukünftige Entwicklung	309
11.1 Potential der Photovoltaik	309
11.1.1 Theoretisches Potential	309
11.1.2 Technisch nutzbare Strahlungsenergie	309
11.1.3 Technisches Stromerzeugungspotential	311
11.1.4 Photovoltaik versus Biomasse	312
11.2 Effiziente Förderinstrumente	313
11.3 Preis- und Vergütungsentwicklung	314
11.3.1 Preisentwicklung von Solarmodulen	314
11.3.2 Entwicklung der Einspeisevergütung	316
11.4 Erneuerbare Energien im heutigen Stromversorgungssystem	317
11.4.1 Struktur der Stromerzeugung	317
11.4.2 Kraftwerksarten und Regelenergie	318
11.4.3 Zusammenspiel aus Sonne und Wind	319
11.4.4 Exemplarische Stromproduktionsverläufe	320
11.5 Überlegungen zur zukünftigen Energieversorgung	322
11.5.1 Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien	322
11.5.2 Optionen zur Speicherung von elektrischer Energie	325
11.5.2.1 Pumpspeicherwerke	325
11.5.2.2 Druckluftspeicher	326
11.5.2.3 Batteriespeicherung	326
11.5.2.4 Elektromobilität	327
11.5.2.5 Wasserstoff als Speicher	327
11.5.2.6 Power-to-Gas: Methanisierung	327
11.5.3 Alternativen zur Speicherung	328
11.5.3.1 Aktives Lastmanagement durch Smart Grids	328
11.5.3.2 Ausbau des Stromnetzes	329
11.5.3.3 Begrenzung der Einspeiseleistung	329
11.5.3.4 Einsatz flexibler Kraftwerke	329
11.6 Fazit	329
12 Übungsaufgaben	331

13	Anhang	342
13.1	Einfluss von Ausrichtung und Neigung auf die Jahresstrahlungssumme an verschiedenen Standorten	342
13.1.1	Standort Hamburg	343
13.1.2	Standort München	344
13.1.3	Standort Bern	345
13.1.4	Standort Wien	346
13.1.5	Standort Marseille	347
13.1.6	Standort Kairo	348
13.2	Checkliste zu Planung, Installation und Betrieb einer Photovoltaikanlage	349
13.3	Im Buch verwendete Abkürzungen	351
13.4	Physikalische Konstanten/Materialparameter	353
Literatur		355
Index		365