

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	31
1.5	Photovoltaik – das Wichtigste in Kürze	32
1.5.1	Was bedeutet „Photovoltaik“?	32
1.5.2	Was sind Solarzellen und Solarmodule?	32
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	39

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-, PERC- und TOPCon-Zelle	121

5 Zellentechnologien 124

5.1	Herstellung kristalliner Silizium-Zellen	124
5.1.1	Vom Sand zum Silizium	124
5.1.1.1	Herstellung von Polysilizium	124
5.1.1.2	Herstellung von monokristallinem Silizium	126
5.1.1.3	Herstellung von multikristallinem Silizium	127
5.1.1.4	Herstellung von quasimonokristallinem Silizium	128
5.1.2	Vom Silizium zum Wafer	128
5.1.2.1	Waferherstellung	128
5.1.2.2	Wafer aus Foliensilizium	129
5.1.3	Herstellung von Standard-Solarzellen	130
5.1.4	Herstellung von Solarmodulen	132
5.2	Zellen aus amorphem Silizium	134
5.2.1	Eigenschaften von amorphem Silizium	134
5.2.2	Herstellungsverfahren	135
5.2.3	Aufbau der pin-Zelle	136
5.2.4	Staebler-Wronski-Effekt	137
5.2.5	Stapelzellen	139
5.2.6	Kombizellen aus mikromorphem Material	140
5.2.7	Integrierte Serienverschaltung	141

5.3	Weitere Dünnschichtzellen.....	143
5.3.1	CIS-Zellen.....	143
5.3.2	Zellen aus Cadmium-Tellurid.....	146
5.4	Hybride Waferzellen.....	148
5.4.1	Kombination von c-Si und a-Si (HIT-Zelle).....	149
5.4.2	Neue Zell- und Modulhersteller.....	150
5.4.2.1	Meyer Burger.....	150
5.4.2.2	Nexwafe.....	151
5.4.2.3	Heckert Solar.....	151
5.4.3	Stapelzellen aus III/V-Halbleitern.....	151
5.5	Sonstige Zellenkonzepte.....	153
5.5.1	Farbstoffsolarzelle.....	153
5.5.2	Organische Solarzelle.....	153
5.5.3	Perowskit-Solarzelle.....	153
5.6	Konzentratorsysteme.....	155
5.6.1	Prinzip der Strahlungsbündelung.....	155
5.6.2	Was bringt die Konzentration?.....	155
5.6.3	Beispiele von Konzentratorsystemen.....	156
5.6.4	Vor- und Nachteile von Konzentratorsystemen.....	157
5.7	Ökologische Fragestellungen zur Zellen- und Modulherstellung.....	158
5.7.1	Umweltauswirkungen bei Herstellung und Betrieb.....	158
5.7.1.1	Beispiel Cadmium-Tellurid.....	158
5.7.1.2	Beispiel Silizium.....	158
5.7.2	Verfügbarkeit der Materialien.....	161
5.7.2.1	Silizium.....	162
5.7.2.2	Cadmium-Tellurid.....	162
5.7.2.3	CIS.....	162
5.7.2.4	III/V-Halbleiter.....	163
5.7.3	Energierücklaufzeit und Erntefaktor.....	163
5.8	Zusammenfassung.....	166
6	Solarmodule und Solargeneratoren.....	169
6.1	Eigenschaften von Solarmodulen.....	169
6.1.1	Solarzellenkennlinie in allen vier Quadranten.....	169
6.1.2	Parallelschaltung von Zellen.....	170
6.1.3	Reihenschaltung von Zellen.....	171

6.1.4	Einsatz von Bypassdioden	172
6.1.4.1	Reduzierung von Verschattungsverlusten	172
6.1.4.2	Vermeidung von Hotspots	174
6.1.5	Typische Kennlinien von Solarmodulen	177
6.1.5.1	Variation der Bestrahlungsstärke	177
6.1.5.2	Temperaturverhalten	178
6.1.6	Halbzellenmodule	179
6.1.6.1	Betrachtung der Verlustleistung	180
6.1.6.2	Aufbau von Halbzellenmodulen	181
6.1.6.3	Verhalten bei Teilverschattungen	182
6.1.7	Sonderfall Dünnschichtmodule	184
6.1.8	Beispiele von Datenblattangaben	186
6.2	Verschaltung von Solarmodulen	186
6.2.1	Parallelschaltung von Strings	186
6.2.2	Was passiert bei Verkabelungsfehlern?	188
6.2.3	Verluste durch Mismatching	189
6.2.4	Schlaue Verschaltung bei Verschattung	189
6.3	Gleichstrom-Komponenten	192
6.3.1	Prinzipieller Anlagenaufbau	192
6.3.2	Gleichstromverkabelung	193
6.4	Anlagentypen	195
6.4.1	Freilandanlagen	195
6.4.2	Flachdachanlagen	197
6.4.3	Schrägdachanlagen	199
6.4.4	Fassadenanlagen	200
6.4.5	Schwimmende Anlagen	202
6.4.6	Agri-Photovoltaik	204
6.4.6.1	Kulturschutzsysteme	204
6.4.6.2	Weitere Projekte und Technologien	206
6.4.6.3	Nutzung vertikaler bifacialer Agri-PV-Systeme	207
6.4.6.4	Installation einer Großanlage	209
6.4.6.5	Einsatz von bifacialen Solarzäunen	209
6.4.7	Photovoltaik-Kraftwerke außerhalb des Erneuerbare-Energien-Gesetzes	210
6.4.8	Vereinbarkeit von Ökonomie und Ökologie	210

7	Systemtechnik netzgekoppelter Anlagen	213
7.1	Solargenerator und Last	213
7.1.1	Widerstandslast	213
7.1.2	DC/DC-Wandler	214
7.1.2.1	Idee	214
7.1.2.2	Tiefsetzsteller	215
7.1.2.3	Hochsetzsteller	217
7.1.3	MPP-Tracker	219
7.2	Aufbau netzgekoppelter Anlagen	220
7.2.1	Einspeisevarianten	220
7.2.2	Anlagenkonzepte	221
7.3	Aufbau von Wechselrichtern	223
7.3.1	Aufgaben des Wechselrichters	223
7.3.2	Netzgeführte und selbstgeführte Wechselrichter	224
7.3.3	Trafoloser Wechselrichter	224
7.3.4	Wechselrichter mit Netztrafo	226
7.3.5	Wechselrichter mit HF-Trafo	227
7.3.6	Dreiphasige Einspeisung	228
7.3.7	Weitere schlaue Konzepte	229
7.4	Wirkungsgrad von Wechselrichtern	230
7.4.1	Umwandlungswirkungsgrad	231
7.4.2	Europäischer Wirkungsgrad	232
7.4.3	Gesamtwirkungsgrad	234
7.4.4	Schlaues MPP-Tracking	234
7.5	Dimensionierung von Wechselrichtern	235
7.5.1	Leistungsdimensionierung	235
7.5.2	Spannungsdimensionierung	236
7.5.3	Stromdimensionierung	237
7.6	Anforderungen der Netzbetreiber	237
7.6.1	Vermeidung von Inselbetrieb	238
7.6.2	Maximale Einspeiseleistung	239
7.6.3	Blindleistungsbereitstellung	240
7.7	Sicherheitsaspekte	243
7.7.1	Erdung des Generators und Blitzschutz	243
7.7.2	Brandschutz	244

8	Speicherung von Solarstrom	245
8.1	Prinzip der Solarstromspeicherung	245
8.2	Akkumulatoren	246
8.2.1	Blei-Säure-Batterie	247
8.2.1.1	Prinzip und Aufbau	247
8.2.1.2	Typen von Bleiakkus	249
8.2.1.3	Akkukapazität	251
8.2.1.4	Spannungsverlauf	252
8.2.1.5	Fazit	252
8.2.2	Laderegler	252
8.2.2.1	Serienregler	253
8.2.2.2	Shuntregler	253
8.2.2.3	MPP-Laderegler	254
8.2.2.4	Produktbeispiele	254
8.2.3	Lithium-Ionen-Batterie	255
8.2.3.1	Prinzip und Aufbau	256
8.2.3.2	Reaktionen beim Lade- und Entladevorgang	257
8.2.3.3	Materialkombinationen und Zellspannung	258
8.2.3.4	Sicherheitsaspekte	259
8.2.3.5	Ladeverfahren	259
8.2.3.6	Bauformen	260
8.2.3.7	Lebensdauer	261
8.2.3.8	Einsatzbereiche	262
8.2.3.9	Fazit	262
8.2.4	Natrium-Schwefel-Batterie	262
8.2.4.1	Prinzip und Aufbau	262
8.2.4.2	Besonderheiten der Hochtemperatur-Batterie	263
8.2.4.3	Natrium-Schwefel-Batterien in der Praxis	264
8.2.4.4	Fazit	265
8.2.5	Redox-Flow-Batterie	265
8.2.5.1	Prinzip und Aufbau	265
8.2.5.2	Verhalten im praktischen Einsatz	268
8.2.5.3	Fortschritte bei Redox-Flow-Batterien	269
8.2.5.4	Konkrete Anwendungen	269
8.2.5.5	Fazit	270
8.2.6	Vergleich der verschiedenen Batterietypen	270

8.3	Speichereinsatz zur Erhöhung des Eigenverbrauchs	270
8.3.1	Eigenverbrauch in Privathaushalten	271
8.3.1.1	Lösung ohne Speicher	272
8.3.1.2	Lösung mit Speicher	273
8.3.1.3	Beispiele von Speichersystemen	274
8.3.1.4	Was kostet die Speicherung einer Kilowattstunde?	274
8.3.1.5	Das Smart Home	277
8.3.2	Eigenverbrauch in Gewerbebetrieben	277
8.3.2.1	Beispiel Produktionsbetrieb	277
8.3.2.2	Beispiel Krankenhaus	278
8.4	Speichereinsatz aus Sicht des Netzes	280
8.4.1	Peak-Shaving durch Speicher	280
8.4.2	Marktanreizprogramm für Solarspeicher	280
8.5	Das Dream-Team Photovoltaik und Elektroauto	284
8.5.1	Vergleich der Wirkungsgrade	284
8.5.2	Aktuelle Situation	284
8.5.3	Die Tücken der Ladetechnik	285
8.5.4	Visualisierung des Ladezustands	286
8.5.5	Elektroauto als Stromspeicher?	287
8.6	Inselsysteme	287
8.6.1	Prinzipieller Aufbau	287
8.6.2	Beispiele von Inselsystemen	288
8.6.2.1	Solar Home Systems	288
8.6.2.2	Hybridsysteme	289
8.6.3	Dimensionierung von Inselanlagen	291
8.6.3.1	Erfassung des Stromverbrauchs	291
8.6.3.2	Dimensionierung des PV-Generators	292
8.6.3.3	Auswahl des Akkus	294
9	Photovoltaische Messtechnik	296
9.1	Messung solarer Strahlung	296
9.1.1	Globalstrahlungssensoren	296
9.1.1.1	Pyranometer	296
9.1.1.2	Strahlungssensoren aus Solarzellen	298
9.1.2	Messung von Direkt- und Diffusstrahlung	299

9.2	Leistungsmessung von Solarmodulen	300
9.2.1	Aufbau eines Solarmodul-Leistungsprüfstands	300
9.2.2	Güteklassen von Modulflashern	301
9.2.3	Bestimmung der Modulparameter	302
9.3	Peakleistungsmessung vor Ort	303
9.3.1	Prinzip der Peakleistungsmessung	303
9.3.2	Möglichkeiten und Grenzen des Messprinzips	304
9.4	Thermographie-Messtechnik	305
9.4.1	Prinzip der Infrarot-Temperaturmessung	305
9.4.2	Hell-Thermographie von Solarmodulen.....	306
9.4.3	Dunkel-Thermographie	308
9.5	Elektrolumineszenz-Messtechnik	309
9.5.1	Messprinzip	309
9.5.2	Beispiele von Aufnahmen	310
9.5.3	LowCost-Outdoor-Elektrolumineszenz-Untersuchungen	313
9.6	Untersuchungen zur spannungsinduzierten Degradation (PID)	315
9.6.1	Erklärung des PID-Effektes	316
9.6.2	Prüfung von Modulen auf PID	317
9.6.3	EL-Untersuchungen zu PID	319
9.7	String-Dunkelkennlinien-Technik	320
9.7.1	Motivation	320
9.7.2	Messmethode	321
9.7.3	Detektion von PID	321
9.7.4	Detektion von defekten Bypassdioden und Zellverbindern	322
9.7.5	Fazit	325

10 Planung und Betrieb netzgekoppelter Anlagen 326

10.1	Planung und Dimensionierung	326
10.1.1	Standortwahl	326
10.1.2	Verschattungen	327
10.1.2.1	Verschattungsanalyse	327
10.1.2.2	Nahverschattungen	328
10.1.2.3	Eigenverschattungen	330
10.1.2.4	Optimierte Stringverschaltung	331
10.1.3	Anlagendimensionierung mit Simulationsprogrammen	331
10.1.3.1	Wechselrichter-Auslegungstools	331
10.1.3.2	Simulationsprogramme für Photovoltaikanlagen	331

10.2	Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen	334
10.2.1	Das Erneuerbare-Energien-Gesetz	334
10.2.2	Renditeberechnung.....	334
10.2.2.1	Eingangsgrößen	334
10.2.2.2	Amortisationszeit.....	335
10.2.2.3	Objektrendite	336
10.2.2.4	Renditeerhöhung durch Eigenverbrauch des Solarstroms	337
10.2.2.5	Weitere Einflussgrößen	338
10.3	Überwachung, Monitoring und Visualisierung.....	338
10.3.1	Methoden zur Anlagenüberwachung	339
10.3.2	Monitoring von PV-Anlagen	339
10.3.2.1	Spezifische Erträge	339
10.3.2.2	Verluste	340
10.3.2.3	Performance Ratio	341
10.3.2.4	Konkrete Maßnahmen zum Monitoring	341
10.3.3	Visualisierung	342
10.4	Betriebsergebnisse von konkreten Anlagen	343
10.4.1	Schrägdachanlage aus dem Jahre 1996	343
10.4.2	Schrägdachanlage aus dem Jahre 2002	345
10.4.3	Flachdachanlage aus dem Jahre 2008	346

11	Zukünftige Entwicklung.....	348
11.1	Potential der Photovoltaik	348
11.1.1	Theoretisches Potential	348
11.1.2	Technisch nutzbare Strahlungsenergie	348
11.1.3	Technisches Stromerzeugungspotential.....	350
11.1.4	Photovoltaik versus Biomasse.....	351
11.2	Effiziente Förderinstrumente	352
11.3	Preis- und Vergütungsentwicklung.....	354
11.3.1	Preisentwicklung von Solarmodulen.....	354
11.3.2	Entwicklung der Einspeisevergütung	355
11.4	Erneuerbare Energien im heutigen Stromversorgungssystem	356
11.4.1	Struktur der Stromerzeugung	357
11.4.2	Kraftwerksarten und Regelenergie	358
11.4.3	Zusammenspiel aus Sonne und Wind	359
11.4.4	Exemplarische Stromproduktionsverläufe	361

11.5 Überlegungen zur zukünftigen Energieversorgung	362
11.5.1 Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien	362
11.5.2 Optionen zur Speicherung von elektrischer Energie	367
11.5.2.1 Pumpspeicherwerke	367
11.5.2.2 Druckluftspeicher	368
11.5.2.3 Batteriespeicherung	368
11.5.2.4 Nutzung der Elektromobilität für das Stromnetz	369
11.5.2.5 Wasserstoff als Speicher	369
11.5.2.6 Power-to-Gas: Methanisierung	370
11.5.3 Alternativen zur Speicherung	371
11.5.3.1 Aktives Lastmanagement durch Smart Grids	371
11.5.3.2 Ausbau des Stromnetzes	372
11.5.3.3 Begrenzung der Einspeiseleistung	372
11.5.3.4 Einsatz flexibler Kraftwerke	372
11.6 Fazit	372
12 Übungsaufgaben	374
13 Anhang	385
13.1 Einfluss von Ausrichtung und Neigung auf die Jahresstrahlungssumme an verschiedenen Standorten	385
13.1.1 Standort Hamburg	386
13.1.2 Standort München	387
13.1.3 Standort Bern	388
13.1.4 Standort Marseille	389
13.1.5 Standort Kairo	390
13.2 Checkliste zu Planung, Installation und Betrieb einer Photovoltaikanlage	391
13.3 Im Buch verwendete Abkürzungen	393
13.4 Physikalische Konstanten/Materialparameter	394
Literatur	395
Index	405