



Inhaltsverzeichnis

Konrad Mertens

Photovoltaik

Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis

ISBN (Buch): 978-3-446-43410-3

ISBN (E-Book): 978-3-446-43411-0

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43410-3>

sowie im Buchhandel.

Inhalt

1	Einführung	17
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

2	Strahlungsangebot der Sonne	37
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
3	Grundlagen der Halbleiterphysik	58
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	Eigenleitendichte	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 η	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 Strahlungs Bündelung	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 Solargeneratoren148

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**