

Leseprobe

Konrad Mertens

Photovoltaik

Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis

ISBN (Buch): 978-3-446-44232-0

ISBN (E-Book): 978-3-446-44107-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44232-0>

sowie im Buchhandel.

Vorwort

Dieses Buch entstand in Folge meiner Vorlesungen zum Thema Photovoltaik an der Fachhochschule Münster. Immer wieder fragten die Studenten nach einem geeigneten Lehrbuch, das ich ihnen zur Begleitung der Vorlesung empfehlen könne. Leider war die Suche auf dem Buchmarkt schwierig, obwohl es eine ganze Reihe von Büchern zum Thema Photovoltaik gibt. Viele Lehrbücher konzentrieren sich fast ausschließlich auf die Zelltechnologien und betrachten diese von einer sehr theoretischen, formellastigen Seite. Hinzu kommt, dass der Inhalt oftmals veraltet ist. Auf der anderen Seite existieren Bücher zur Planung und Auslegung von Photovoltaikanlagen. Diese können einem Solarinstallateur durchaus Hilfestellung geben, vereinfachen aber die technischen Sachverhalte so stark, dass sie keine Basis zu einem echten Verständnis der Photovoltaik sind.

Aus diesem Grund wurde im vorliegenden Buch Wert auf eine anschauliche und gleichzeitig korrekte Darstellung der physikalischen und elektrotechnischen Grundlagen gelegt. Neben den Zelltechnologien stehen auch die Systemtechnik (Wechselrichter, Anlagentypen etc.) sowie Planung und Betrieb (Standortwahl, Monitoring von Anlagen etc.) im Mittelpunkt. Eine Besonderheit ist außerdem die Präsentation aktueller Methoden zur Vermessung und Qualitätsuntersuchung von Solarmodulen, wie sie im Photovoltaik-Testlabor der Fachhochschule Münster angewendet werden.

Ein ausdrücklicher Dank gilt meinen Studenten, die mit großem Interesse und Engagement die Vorlesung Photovoltaik Jahr für Jahr bereichern. Ihre klugen Fragen haben Eingang in dieses Buch gefunden, so dass die jeweiligen Antworten auch dem Leser dienen können. Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Josef Lindenbaum für fruchtbare fachliche Diskussionen und seine Unterstützung bei einer Vielzahl von Messungen.

„Papa, seit du an diesem Buch schreibst, hast du gar keine Zeit mehr für uns“, diesen Vorwurf hörte ich gelegentlich während der Entstehungszeit dieses Buches. Daher gilt mein besonderer Dank meiner Frau Annette sowie meinen Kindern Martin, Barbara und Viktoria, die mich während dieser Zeit immer unterstützt haben.

Steinfurt, im August 2011

Konrad Mertens

Vorwort zur dritten Auflage

Die große Nachfrage macht es möglich, dass die inzwischen dritte Auflage dieses Lehrbuches erscheinen kann. Ausdrücklich bedanke ich mich bei den Lesern für die fast durchweg sehr positiven Kommentare zur zweiten Auflage. Da die Entwicklung der Photovoltaik rasch voranschreitet, enthält die neue Auflage neben den üblichen Aktualisierungen auch umfangreiche Erweiterungen. So wurde ein vollständig neues Kapitel „Speicherung von Solarstrom“ aufgenommen. Das Kapitel zur photovoltaischen Messtechnik wurde ergänzt um die Beschreibung aktueller Vorort-Untersuchungsmethoden wie Outdoor-Elektrolumineszenz und die Erkennung von potentialinduzierter Degradation von Solarmodulen. Da die Photovoltaik inzwischen relevante Beiträge zur Stromversorgung liefert, behandelt das Kapitel „Zukünftige Entwicklung“ neben der Potentialbetrachtung und Preisentwicklung nun auch das Zusammenspiel der verschiedenen erneuerbaren Energien in Gegenwart und Zukunft.

Besonders hinweisen möchte ich auf die Homepage

www.lehrbuch-photovoltaik.de

Auf dieser finden sich unter anderem die Abbildungen des Buches, unterstützende Software, die Lösungen der Übungsaufgaben und Korrekturen zum Buch.

Ich wünsche allen Lesern viel Freude und Erfolg beim Einarbeiten in die Photovoltaik.

Steinfurt, im Juli 2015

Konrad Mertens

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	Hocheffizienzzenellen	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 Solargeneratoren158

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 Anlagen287

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

2

Strahlungsangebot der Sonne

Grundlage allen Lebens auf der Erde ist die Strahlung der Sonne. Ebenso basiert die Nutzung der Photovoltaik auf dem Vorhandensein des Sonnenlichts. Wir wollen uns daher in diesem Kapitel die Eigenschaften und Möglichkeiten der Solarstrahlung ansehen.

2.1 Eigenschaften der Solarstrahlung

2.1.1 Solarkonstante

Die Sonne stellt einen gigantischen Fusionsreaktor dar, in dessen Innerem je vier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern verschmelzen. Bei dieser Kernfusion entstehen Temperaturen von rund 15 Millionen Grad Celsius. Die frei werdende Energie wird in Form von Strahlung in den Weltraum abgegeben.

Bild 2.1 zeigt maßstäblich das Sonne-Erde-System. Der Abstand zwischen beiden Himmelskörpern beträgt rund 150 Mio. km, die weiteren Größen können Tabelle 2.1 entnommen werden.

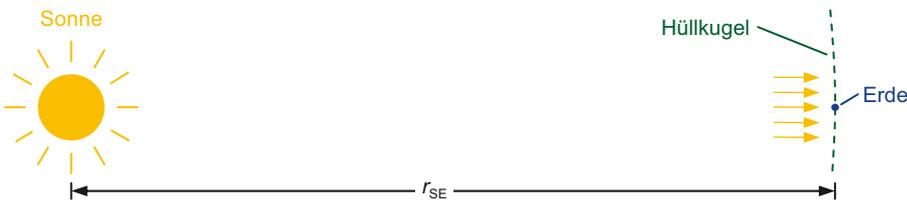


Bild 2.1 Ermittlung der Solarkonstanten

Tabelle 2.1 Eigenschaften von Sonne und Erde

Eigenschaft	Sonne	Erde
Durchmesser	$d_{\text{Sonne}} = 1.392.520 \text{ km}$	$d_{\text{Erde}} = 12.756 \text{ km}$
Oberflächentemperatur	$T_{\text{Sonne}} = 5778 \text{ K}$	$T_{\text{Erde}} = 288 \text{ K}$
Mittelpunktstemperatur	15.000.000 K	6700 K
Abgestrahlte Leistung	$P_{\text{Sonne}} = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$	–
Abstand Sonne–Erde	$r_{\text{SE}} = 149,6 \text{ Mio. km}$	

Die Sonne strahlt kontinuierlich eine Strahlungsleistung von $P_{\text{Sonne}} = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$ in alle Richtungen ab, von der die Erde nur einen minimalen Bruchteil empfängt. Um diesen Wert

zu berechnen, stellen wir uns eine Hüllkugel um die Sonne herum vor, die einen Radius von $r = r_{SE}$ aufweist. Die von der Sonne abgestrahlte Leistung hat sich in diesem Abstand bereits auf die gesamte Kugeloberfläche verteilt. Am Ort der Erde erhalten wir somit folgende Leistungsdichte bzw. **Bestrahlungsstärke**:

$$E_S = \frac{\text{Strahlungsleistung}}{\text{Kugeloberfläche}} = \frac{P_{\text{Sonne}}}{4 \cdot \pi \cdot r_{SE}^2} = \frac{3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4 \cdot \pi \cdot (1,496 \cdot 10^{11} \text{ m})^2} = 1367 \text{ W/m}^2 \quad (2.1)$$

Das Ergebnis von 1367 W/m^2 wird als **Solarkonstante** bezeichnet.

Die Solarkonstante beträgt $E_S = 1367 \text{ W/m}^2$. Sie gibt die Bestrahlungsstärke außerhalb der Erdatmosphäre an.

2.1.2 Spektrum der Sonne

Jeder heiße Körper gibt Strahlung an seine Umgebung ab. Nach dem **planckschen Strahlungsgesetz** bestimmt dabei die Oberflächentemperatur das Spektrum der Strahlung. Im Fall der Sonne liegt die Oberflächentemperatur bei 5778 K , was zu dem in Bild 2.2 gezeigten idealisierten **Schwarzkörperspektrum** führt (gestrichelte Linie). Das tatsächlich außerhalb der Erdatmosphäre gemessene Spektrum (**AM 0**) folgt dieser idealisierten Linie annähernd. Der Ausdruck AM 0 steht für **Air Mass 0**; dies bedeutet, dass dieses Licht nicht durch die Atmosphäre gelaufen ist. Summiert man die Einzelbeiträge dieses Spektrums in Bild 2.2, so ergibt sich eine Bestrahlungsstärke von 1367 W/m^2 ; also die schon bekannte Solarkonstante.

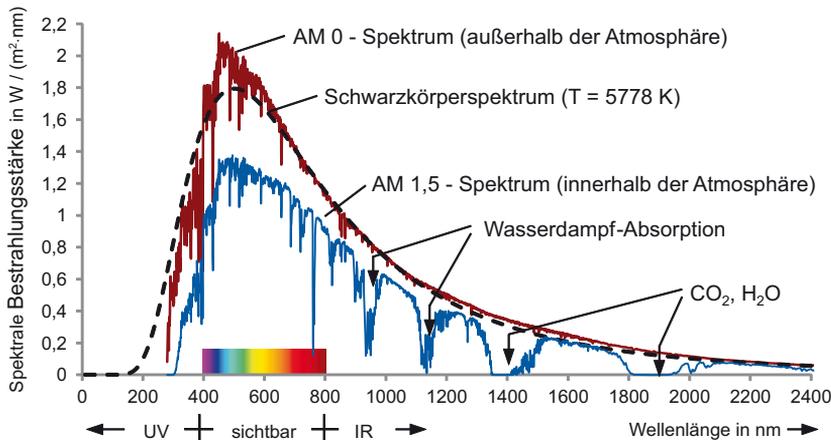


Bild 2.2 Spektren außerhalb und innerhalb der Atmosphäre

Bei Durchtritt des Sonnenlichts durch die Atmosphäre ändert sich das Spektrum allerdings. Dafür gibt es verschiedene Gründe:

1. Reflexion von Licht:

An der Atmosphäre kommt es zu einer Reflexion von Licht, die die auf die Erde auftreffende Strahlung reduziert.

2. Absorption von Licht:

Bei bestimmten Wellenlängen werden Moleküle (O_2 , O_3 , H_2O , $CO_2 \dots$) angeregt und absorbieren einen Teil der Strahlung, daher entstehen insbesondere im Infrarotbereich „Lücken“ im Spektrum (siehe z. B. Bild 2.2 bei $\lambda = 1400 \text{ nm}$).

3. Rayleigh-Streuung:

Fällt Licht auf Teilchen, die kleiner als die Wellenlänge sind, so kommt es zur **Rayleigh-Streuung**. Diese ist stark wellenlängenabhängig ($\sim 1/\lambda^4$), so dass kürzere Wellenlängen (blau) besonders stark gestreut werden.

4. Streuung an Aerosolen und Staubteilchen:

Hierbei handelt es sich um Teilchen, die groß gegenüber der Wellenlänge des Lichts sind. In diesem Fall spricht man von **Mie-Streuung**. Die Stärke der Mie-Streuung ist stark vom Standort abhängig; in dicht besiedelten Gebieten mit Industrie ist sie am größten.

2.1.3 Air Mass

Wie wir gesehen haben, ändert sich das Spektrum bei Durchtritt durch die Atmosphäre. Dieser Effekt ist umso größer, je länger der Lichtweg ist. Daher benennt man die verschiedenen Spektren nach der Weglänge der Strahlen durch die Atmosphäre. Bild 2.3 zeigt dazu das Prinzip: Der Ausdruck AM 1,5 bedeutet beispielsweise, dass das Licht den 1,5-fachen Weg im Vergleich zum senkrechten Durchtritt durch die Atmosphäre zurückgelegt hat.

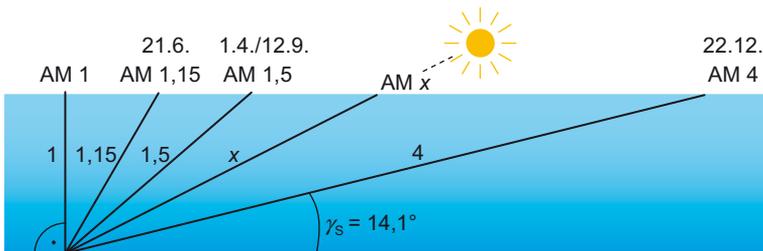


Bild 2.3 Erklärung des Begriffes Air Mass: Die Zahl x gibt jeweils die Wegverlängerung gegenüber dem senkrechten Durchtritt durch die Atmosphäre an (hier für den Standort Berlin, nach [Qua13a])

Bei bekanntem **Sonnenhöhenwinkel γ_s der Sonne** ergibt sich der AM-Wert x zu:

$$x = \frac{1}{\sin \gamma_s} \quad (2.2)$$

Je nach Tages- und Jahreszeit steht die Sonne unterschiedlich hoch. In Bild 2.3 ist für den Standort Berlin angegeben, an welchen Tagen die jeweiligen AM-Werte erreicht werden (jeweils mittäglicher Sonnenhöchststand).

Als **Standardspektrum** zur Vermessung von Solarmodulen hat sich das **AM 1,5-Spektrum** etabliert, da es im Frühjahr und Herbst auftritt und gewissermaßen als **durchschnittliches Jahrespektrum** angesehen werden kann.

2.2 Globalstrahlung

2.2.1 Entstehung der Globalstrahlung

Die verschiedenen Effekte wie Streuung und Absorption bewirken eine Abschwächung des aus dem Weltraum kommenden AM 0-Spektrums. Bei der Summation des in Bild 2.2 gezeigten AM 1,5-Spektrums erhält man lediglich 835 W/m^2 . Am Erdboden kommen also von den ursprünglich vorhandenen 1367 W/m^2 nur noch 61 % als so genannte **Direktstrahlung** an. Allerdings entsteht durch die Streuung von Licht in der Atmosphäre ein weiterer Strahlungsanteil: die **Diffusstrahlung** (siehe Bild 2.4).

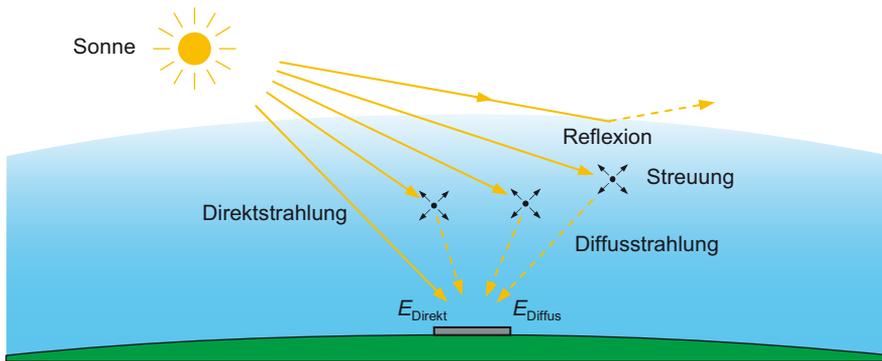


Bild 2.4 Entstehung der Globalstrahlung: Sie ergibt sich aus der Summe von Direkt- und Diffusstrahlung

Aus allen Richtungen des Himmels kommen schwache Strahlungsanteile und addieren sich zur Diffusstrahlung auf. Die Summe aus beiden Strahlungsarten nennt man **Globalstrahlung**:

$$E_G = E_{\text{Direkt}} + E_{\text{Diffus}} \quad (2.3)$$

An einem schönen, klaren Sommertag kann man auf einer Fläche senkrecht zur Sonneinstrahlung Globalstrahlungswerte von $E_G = E_{\text{STC}} = 1000 \text{ W/m}^2$ messen. Dies ist der Grund, warum man bei der Festlegung der **Standardtestbedingungen für Solarmodule** (siehe Abschnitt 1.5) ein um den Faktor $1000/835 = 1,198$ **aufgewertetes AM 1,5-Spektrum** verwendet. Dieses hat dann eine Gesamtleistungsdichte von exakt $E_{\text{STC}} = 1000 \text{ W/m}^2$ und ist somit geeignet, die Spitzenleistung eines Solarmoduls zu ermitteln.



Kommen in der Realität eigentlich niemals höhere Bestrahlungsstärken als 1000 W/m^2 vor?



In Einzelfällen kann es durchaus zu höheren Globalstrahlungsstärken kommen. Dies ist zum einen der Fall in Bergregionen wie den Alpen. Neben der verringerten Atmosphärendicke kann es dort zur Reflexion von Sonnenlicht an Schnee und Eis

kommen. Zum anderen misst man auch im Flachland manchmal Strahlungswerte von bis zu 1300 W/m^2 . Dies passiert bei sonnigem Wetter und hellen leichten Wolken rund um die Sonne, welche den Diffusstrahlungsanteil anheben. Diesen Effekt bezeichnet man als **Cloud Enhancements**.

2.2.2 Beiträge von Diffus- und Direktstrahlung

Der Beitrag der Diffusstrahlung zur Globalstrahlung wird oft unterschätzt. In Deutschland liefert die Diffusstrahlung über das ganze Jahr gesehen einen größeren Beitrag als die Direktstrahlung. Als Beweis betrachten wir Tabelle 2.2. Dort sind für verschiedene Standorte die Monatsmittel der **Strahlungssummen H** auf eine horizontale Fläche aufgeführt.

Tabelle 2.2 Strahlungssummen pro Quadratmeter und Tag über das Jahr auf eine horizontale Ebene für verschiedene Standorte in $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ [Hüb10]

Ort		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ
Hamburg	H_{Direkt}	0,13	0,37	0,74	1,49	2,18	2,32	2,01	1,82	1,10	0,52	0,18	0,10	1,08
	H_{Diffus}	0,40	0,78	1,35	2,04	2,55	2,79	2,67	2,26	1,63	0,99	0,51	0,31	1,52
	H	0,53	1,15	2,09	3,53	4,73	5,11	4,68	4,08	2,73	1,51	0,69	0,41	2,60
Berlin	H_{Direkt}	0,15	0,38	0,86	1,51	2,28	2,45	2,35	2,04	1,26	0,58	0,18	0,09	1,18
	H_{Diffus}	0,45	0,82	1,42	2,06	2,57	2,80	2,69	2,28	1,69	1,05	0,54	0,34	1,56
	H	0,60	1,20	2,28	3,57	4,85	5,25	5,04	4,32	2,95	1,63	0,72	0,43	2,74
München	H_{Direkt}	0,36	0,75	1,28	1,83	2,43	2,62	2,69	2,26	1,71	0,89	0,38	0,24	1,45
	H_{Diffus}	0,67	1,05	1,60	2,18	2,61	2,81	2,71	2,35	1,82	1,24	0,75	0,55	1,70
	H	1,03	1,80	2,88	4,01	5,04	5,43	5,40	4,61	3,53	2,13	1,13	0,79	3,15
Marseille	H_{Direkt}	1,01	1,34	2,40	3,24	4,03	4,78	5,03	4,24	3,05	1,76	1,05	0,79	2,72
	H_{Diffus}	0,79	1,11	1,49	1,90	2,16	2,18	2,02	1,85	1,58	1,24	0,87	0,70	1,49
	H	1,80	2,45	3,89	5,14	6,19	6,96	7,05	6,09	4,63	3,00	1,92	1,49	4,21
Kairo	H_{Direkt}	2,16	2,94	3,80	4,60	5,41	5,95	5,82	5,34	4,50	3,56	2,48	1,92	4,04
	H_{Diffus}	1,26	1,47	1,76	1,99	2,05	2,01	1,99	1,89	1,73	1,50	1,30	1,18	1,68
	H	3,42	4,41	5,56	6,59	7,46	7,96	7,81	7,23	6,23	5,06	3,78	3,10	5,72

In **Hamburg** liegt die mittlere Diffusstrahlungssumme H_{Diffus} bei $1,52 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ gegenüber einem H_{Direkt} von $1,08 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. Somit trägt die **Diffusstrahlung knapp 60 % zur Jahresglobalstrahlung** bei. In **München** ist die Lage etwas verändert: die Diffusstrahlung erbringt hier nur einen **Beitrag von 54 %**.

Wir fassen daher zusammen:

In Deutschland liefert die Diffusstrahlung einen leicht höheren Beitrag zur Globalstrahlung als die Direktstrahlung.

Anders ist die Lage in südlichen Ländern: In **Marseille und Kairo** erbringt die **Direktstrahlung mit 65 % bzw. 71 %** den Hauptanteil an der Globalstrahlung.

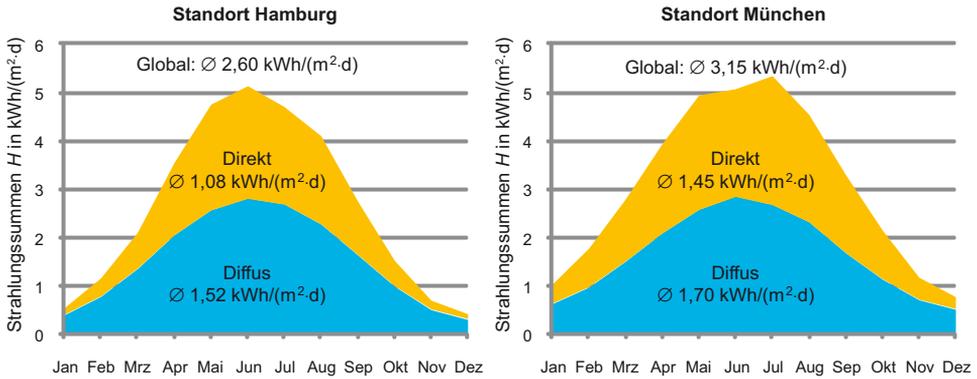


Bild 2.5 Strahlungssummen über das Jahr auf eine horizontale Ebene für die Standorte Hamburg und München

In Bild 2.5 sind die Daten von Hamburg und München noch einmal graphisch dargestellt. Was können wir daraus entnehmen? Zunächst einmal wird sichtbar, dass sich der Betrieb einer Photovoltaikanlage in München mehr lohnt als in Hamburg. Die mittlere Globalstrahlungssumme von $H = 3,15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ergibt über das ganze Jahr gesehen (365 Tage) eine Jahressumme von

$$H = 3,15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \cdot 365 \text{ d/a} = 1150 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}).$$

Die entsprechende Jahressumme in Hamburg beträgt lediglich 949 Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr.

Weiter wird sichtbar, dass die Diffusstrahlung in München nur wenig über der in Hamburg liegt. Die höhere Globalstrahlung in München wird hauptsächlich durch die größere Direktstrahlung erreicht. Der Grund dafür ist leicht zu erraten: Die in München höher stehende Sonne. Die Sonnenhöhe hat aber offensichtlich kaum einen Einfluss auf die Diffusstrahlung.

Wie unterschiedlich die Tagesgänge von Direkt- und Diffusstrahlung sein können, zeigt Bild 2.6. Hier werden die Stundensummen der Strahlung für einen sonnigen und einen be-

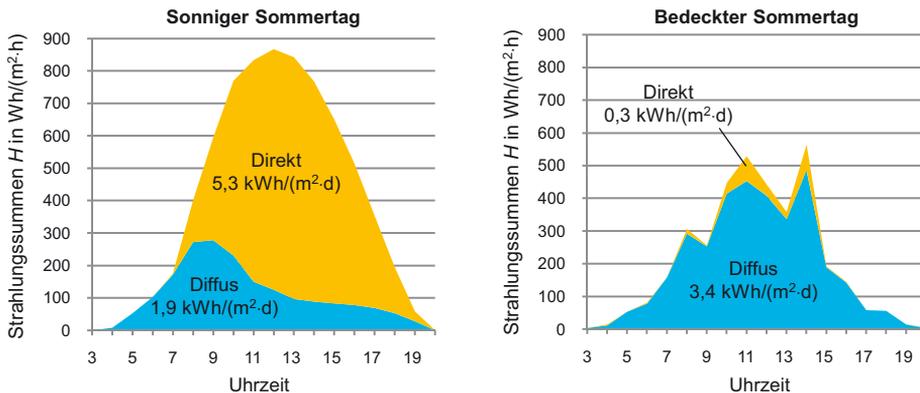


Bild 2.6 Stunden-Strahlungssummen an zwei Sommertagen in Braunschweig: Der bedeckte Tag erbringt immerhin gut die Hälfte der Strahlungsenergie des sonnigen Tages [Pal98]

deckten Sommertag dargestellt. Am sonnigen Tag dominiert deutlich die Direktstrahlung, während sie am bedeckten Tag gegenüber der Diffusstrahlung praktisch keine Rolle spielt. Dennoch erbringt der bedeckte Tag mit $3,7 \text{ kWh/m}^2$ noch mehr als die Hälfte der Strahlung des sonnigen Tages. Dies zeigt, wie ergiebig auch die bedeckten Tage für die Photovoltaiknutzung sein können.

2.2.3 Globalstrahlungskarten

Um den Ertrag einer Photovoltaikanlage bereits im Planungsstadium abschätzen zu können, benötigt man Daten zur Globalstrahlung am geplanten Standort. Die wichtigste Kenngröße ist dabei die Jahressumme H der Globalstrahlung auf eine horizontale Ebene. Inzwischen gibt es Globalstrahlungskarten, die diese Kenngröße hochaufgelöst darstellen. Als Grundlage dienen langjährige Messungen an einem dichten Netz von Messstationen, Satellitenbilder und Simulationstools. Bild 2.7 zeigt eine derartige Karte des Deutschen Wetterdienstes.

Deutlich sichtbar nimmt die Jahres-Strahlungsenergie von Norden nach Süden hin zu. Die Werte reichen von 900 bis $1150 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Im Mittel kann man in Deutschland etwa von $1000 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ausgehen. Die dabei verwendete ungewohnte Einheit kann man durch ein sehr anschauliches Modell umgehen, das **Modell der Sonnen-Volllaststunden**.

Wir stellen uns dazu vor, dass die Sonne nur zwei Zustände einnehmen kann:

1. Sie strahlt mit „Volllast“: $E = E_{\text{STC}} = 1000 \text{ W/m}^2$.
2. Sie ist ganz „ausgeschaltet“: $E = 0$.

Wie lange muss die Sonne nun mit Volllast laufen, damit sie z. B. eine Strahlungssumme von $H = 1000 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ auf den Erdboden abgibt?

$$\frac{H}{E_{\text{STC}}} = \frac{1000 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 1000 \frac{\text{h}}{\text{a}} \quad (2.4)$$

Die Sonne würde also 1000 Volllaststunden benötigen, um die gleiche optische Energie abzugeben, wie sie sie tatsächlich über ein Jahr (8760 h) liefert.

Die Sonne erbringt in Deutschland etwa 1000 Volllaststunden.

In anderen Ländern sieht die Einstrahlungssituation teilweise deutlich besser aus. Dies zeigt Bild 2.8 anhand einer Globalstrahlungskarte von Europa. Die **Strahlungswerte** liegen größtenteils im Bereich von **1000 bis 1500 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$** . Extreme Werte finden sich z. B. in **Schottland** mit nur **700** und in **Südspanien** mit rund **1800 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$** .

Zur Gesamtübersicht zeigt Bild 2.9 eine **Weltkarte** der Globalstrahlungssummen. Die höchsten Einstrahlungen liegen oberhalb und unterhalb des Äquators mit **Spitzenwerten** von rund **2500 Volllaststunden**.

Index

1000-Dächer-Programm 38

A

Aachener Modell 39
Absorption 65, 81
Absorptionskoeffizient 81, 84, 92, 131
Absorptionswirkungsgrad 95
Air Mass 42, 43
Albedo 56
Amortisationszeit 296
Anlagenmonitoring 300
Anlagenvisualisierung 300
Anode 229
Antireflexbeschichtung 86, 90, 113, 115
Arbeit 22
a-Si 131
Auslegungsfaktor 207
Autarkiegrad 194, 244

B

Back-Surface-Field 94, 117, 119, 128
Bändermodell 68
Bandabstand 68, 78, 81, 104, 108, 140
Banddiagramm 77
Bandlücke 68, 70
Bandlückenwellenlänge 108, 109
Basis 90, 93, 128, 129
Bestrahlungsstärke 42, 88, 99
Betonfundament 179
Betriebskosten 296
Beweglichkeit 71, 133
Biomasse 312
Bleiakku 219, 337
Blei-Säure-Akku 219
Blindleistung 212
Blindleistungsbereitstellung 212
Bohrsches Atommodell 64
Bohrsches Postulat 64

Boost Converter 190
Brechungsindex 85
Brick 124
Buck Converter 188
Buried-Contact 115–117
Busbar 91, 115
Bypassdioden 161, 170, 274
Bypassing 232

C

Cadmium-Tellurid (CdTe) 67, 139, 148
CCCV 231, 337
CdTe 67, 84, 139, 148, 150, 168
CID 232, 351
CIS-Zellen 140
Cloud Enhancements 45
c-Si 82
Current Interrupt Device 232
Current Matching 135
Czochralski-Verfahren 36, 123

D

Dangling Bonds 131, 134
DC/DC-Wandler 187
Dead Layer 92, 120
Degradation 129, 134, 136, 137, 198, 299,
306
Depth of Discharge 221
Diffusionslänge 80, 91, 92, 118
Diffusionsspannung 76, 77, 79, 80
Diffusionsstrom 73, 77, 105
Diffusionszelle 133
Diffusstrahlung 44, 55, 148, 267
Dioden-Kennlinie 80
direkter Halbleiter 83
Direktstrahlung 44, 45, 54, 266
DoD 221, 246, 247
Dotierung 33, 74, 77, 92, 116

Dreikomponentenmodell 53, 292
 Driftgeschwindigkeit 71
 Driftstrom 71
 Driftzelle 133
 DSM 328
 Dünnschichtmodule 138, 168
 Dünnschichtzelle 131–133, 139
 Dunkelstrom 89

E

EEG 34, 39, 295, 298
 effektive Zustandsdichte 71, 78
 EFG 126
 Eigenleitungsdichte 70, 101, 112, 206
 Eigenverbrauch 217
 Eigenverbrauchsanteil 243
 Eigenverbrauchsquote 193, 217, 243, 298
 Eigenverschattungen 290
 Einspeisemanagement 212
 Einspeisevarianten 193
 Einspeisevergütung 193, 296
 Electronic Grade 122
 Elektrolumineszenz-Messtechnik 276
 Emittter 90, 92, 97, 116, 128, 129
 – lokaler 118
 Empfindlichkeit, spektrale 96, 120
 Endenergie 23
 End-Ertrag 301
 Energie 21
 Energiebänder 68
 Energiemanagementsystem 245, 248, 252, 254
 Energierücklaufzeit 152
 Entladetiefe 221, 230, 233, 236, 245
 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 34, 39, 295
 Erntefaktor 153
 Ersatzschaltbild 89, 97
 Ertrag, spezifischer 35, 296
 Ertragswirkungsgrad 312
 Erzeugerzählpfeilsystem 97, 158
 europäischer Wirkungsgrad 205
 EVA 129, 138, 149, 162

F

Farbstoffsolarzelle 144

Fassadenanlagen 184
 Feldstrom 71, 133
 Fermidifferenzen 78
 Flachdachanlagen 181
 Flächennutzungsgrad 291
 Float-Zone-Verfahren 123
 Flussbettreaktor 122, 153
 Foliensilizium 126
 Freilandanlagen 179
 Freilaufdiode 189
 Fresnel-Linsen 145
 Fresnelsche Formeln 86
 Füllfaktor 100, 112, 168

G

GaAs 37, 67, 84, 143
 GaN 206
 Generatoranschlusskasten 175, 176, 195
 Generatorverluste 301
 Globalstrahlung 44, 60, 148, 263
 Globalstrahlungssensoren 263
 Grätzel-Zelle 144

H

Halbleiter 64, 69
 – direkter 83
 – indirekter 82
 HIT-Zelle 142
 Hocheffizienzellen 117
 Hochsetzsteller 190
 Hotspots 163, 170
 hybride Waferzellen 142

I

IBC-Zelle 118
 Idealitätsfaktor 98, 105
 indirekter Halbleiter 82
 Ingot 123, 150
 integrierte Serienverschaltung 138
 Interdigitated Back Contact 118
 Interkalation 229
 Interkalationsmaterial 230
 Investitionskosten 296
 Isolator 69
 ITO 133

J

Jahreswirkungsgrad 208

K

Kabelverluste 177, 293
 Kathode 229
 Kernschatten 289
 Klimawandel 27
 Konzentratorsystem 145, 151
 Kurzschlussstrom 98

L

Lawinendurchbruch 81, 159
 Leerlaufspannung 99
 Leiter 69
 Leitungsband 68
 Lichtabsorption 81
 Light Trapping 116, 117, 119, 135, 137
 lokaler Emittter 118
 Lückbetrieb 190

M

Maxeon-Zelle 118
 Maximum Power Point 99
 metallurgisches Silizium 121
 mikrokristallin 137
 mikromorph 137
 Minutenreserve 318
 Mismatching 172, 195, 202, 267, 302
 Modul-Wechselrichter 195
 Monitoring 300
 monokristallin 113, 123, 124
 MOSFET 188
 MPP-Tracker 192, 202
 multikristallin 124, 125

N

Nachführung 59, 148, 180
 NaS 234
 Natrium-Schwefel 234, 338
 Netzbetreiber 212, 215
 Netzkopplung 287
 Niederspannungsrichtlinie 215
 NOCT 168, 170

O

Objektrendite 297
 Ortszeit, wahre 51, 52

P

Parallelschaltung 159
 Parallelwiderstand 103, 106, 167, 269
 Peakleistungsmessung 270
 PECVD 132
 PERC-Zelle 119, 120
 Performance Ratio 302
 PERL-Zelle 119
 Photodiode 88, 90, 266
 Photostrom 88, 94
 Photovoltaik 32
 PID 198, 282, 339
 pin-Zelle 132, 133, 138
 pn-Übergang 33, 75, 76, 78, 79, 88
 polykristallin 125, 139
 Polysilizium 121, 150, 152
 Potentialstufe 78
 Power-to-Gas 327, 328
 Primärenergie 23, 24, 30, 152, 153
 Primärenergiebedarf 26, 61, 309
 Primärenergiefaktor 153
 Primärregelung 318
 Punktkontakt-Zelle 118, 129, 148
 Pyranometer 263

Q

Quantenwirkungsgrad 96, 97, 120, 135

R

Rammfundament 179
 Raumladungszone 77, 79, 88, 90, 92, 93,
 104, 133
 Rayleigh-Streuung 43
 Recycling 149, 154
 Redox-Flow 237, 338
 Redoxreaktion 219, 220
 Referenz-Ertrag 301
 Reflexionsfaktor 56, 85, 86, 95, 114–116, 119
 Regelenergie 318
 Reihenschaltung 160
 Rekombination 70, 91

Rückseitenfolie 276
Runaway 231

S

Sabatier-Prozess 327
Sättigungsstrom 80, 90, 101, 112
Sahara-Wunder 61
Schleusenspannung 80, 161
Schrägdachanlagen 182
Schraubfundament 179
Schwachlichtverhalten 166, 269, 292
Sekundärenergie 23
Sekundärregelung 318
Serienverschaltung, integrierte 138
Serienwiderstand 103, 107, 127, 269
Shockley-Gleichung 80, 89, 104
Shutdown 231
SiC 206
Siebdruck 127
Siemens-Reaktor 122
Silizium 33, 66, 67, 121
– metallurgisches 121
Simulationsprogramme 292
Sizing Ratio 207
Smart Meter 328
SoC 365
Solar-Grade 122
Solarkonstante 41, 42
Solarmodul 33, 105, 129, 130, 158
Solarzelle 33, 36, 90, 92
Solarzellensymbol 97
Sonnenazimuth 52
Sonnenbahndiagramm 52, 289
Sonnenbahnindikator 288
Sonnendeklination 50, 51, 53
Sonnenhöhe 52
Sonnenhöhenwinkel 43
Sonnenstandsnachführung 148
spektrale Empfindlichkeit 96, 120
spektraler Wirkungsgrad 108, 112
spezifischer Ertrag 35, 296
Staebler-Wronski-Effekt 134
Standard-Ersatzschaltbild 103
Standardtestbedingungen 34, 44
Stapelfehler 282
Stapelzelle 135, 143

State of Charge 365
STC 34
Strahlungsbündelung 145
Strang 33, 129
String 33, 129, 171
Stringdioden 171, 175
String-Ribbon 127
Stringsicherungen 171
String-Wechselrichter 195
Stromerzeugungspotential 311
Substrat-Zelle 135
Superstrat 133, 198
Superstrat-Zelle 133, 198
Systemverluste 302
Systemwirkungsgrad 62, 311

T

Tandemzelle 135
Tastgrad 189
TCO 133
Tedlar-Folie 129
Temperaturabhängigkeit 100, 101
Temperaturkoeffizient 101, 102, 139, 167
Temperaturverhalten 167
Texturierung 113, 115, 116, 119, 127, 135
theoretischer Wirkungsgrad 112, 113
Thermal Runaway 231, 235
Thermalisierungsverluste 109
Thermographie-Messtechnik 272
Tiefsetzsteller 188
Transmissionsverluste 108, 134
Treibhauseffekt 28, 29
Trichlorsilan 121
Tripelzelle 136

U

Umwandlungswirkungsgrad 203, 204

V

Valenzband 68
Vanadium-Redox-Flow 238
Verbindungshalbleiter 67
Verbraucherzählpeilsystem 89, 165, 171
Verschattungsanalyse 288
Verschattungsverluste 115, 161, 173, 293

VisiKid 303
Volllaststunden 47, 301
VRF 238

W

Wafer 125, 127, 129, 149, 153
Waferzellen, hybride 142
wahre Ortszeit 51, 52
Watt-Peak 34
Wechselrichter 34, 196
Wechselrichterwirkungsgrad 206

Wirkungsgrad 34, 100, 108, 124, 146, 155,
200, 203
– europäischer 205
– spektraler 108, 112
– theoretischer 112, 113

Z

Zentral-Wechselrichter 194
Zustandsdichte, effektive 71, 78
Zwei-Dioden-Ersatzschaltbild 107
Zwei-Dioden-Modell 104