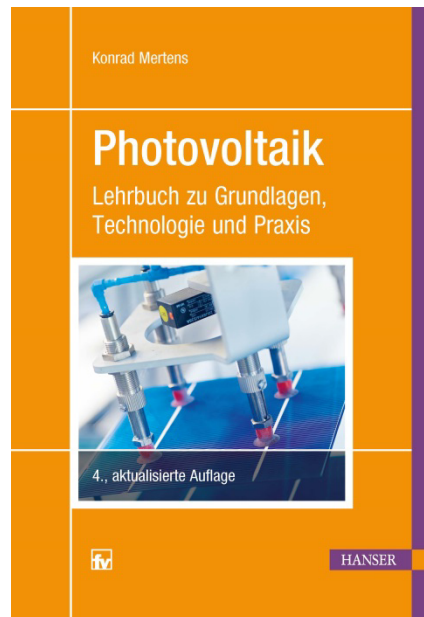


HANSER



Leseprobe

zur

„Photovoltaik, 4.A.“

von Konrad Mertens

ISBN (Buch): 978-3-446-44863-6

ISBN (E-Book): 978-3-446-45617-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44863-6>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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 Zellentechnologien 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 Zellentechnologien 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 vierten Auflage

Die große Nachfrage macht es möglich, dass die inzwischen vierte Auflage dieses Lehrbuches erscheinen kann. Ausdrücklich bedanke ich mich bei den Lesern für die durchweg positiven Kommentare zur dritten Auflage.

Da die Entwicklung der Photovoltaik rasant ist, enthält auch diese neue Auflage neben den üblichen Aktualisierungen einige Erweiterungen. So wurde das Kapitel zur photovoltaischen Messtechnik durch die Beschreibung von neuesten Vorort-Untersuchungsmethoden bei Nacht ergänzt. Außerdem gibt es eine Reihe von neuen Abbildungen und Frage-/Antwort-Blöcken, die das Verständnis in die Technik der Photovoltaik weiter vertiefen helfen.

Besonders hinweisen möchte ich auf die Website

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 April 2018

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 | 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 Serienverschaltung | 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 | Eingangsrößen | 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 Regelenergie | 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 |

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.

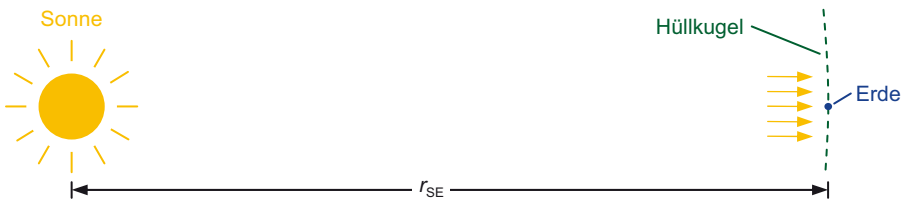


Bild 2.1 Ermittlung der Solarkonstanten

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 | $15.000.000 \text{ K}$ | 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.

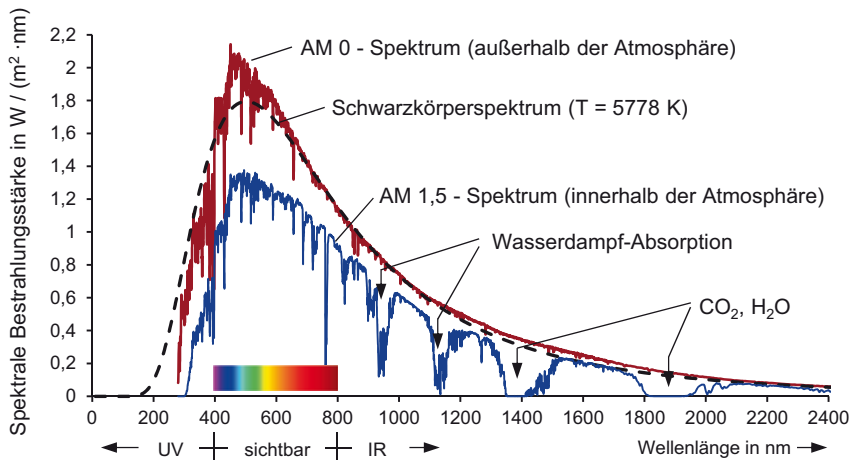


Bild 2.2 Spektren außerhalb und innerhalb der Atmosphäre

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.

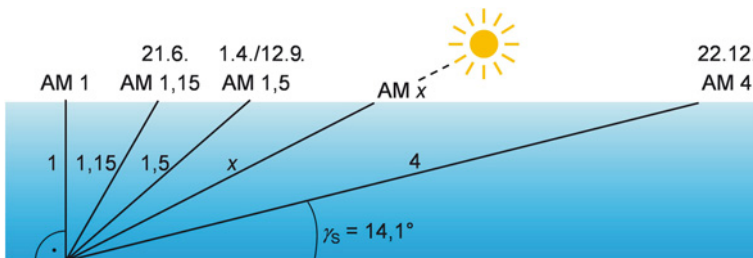


Bild 2.3 Erklärung des Begriffes Air Mass: Die Zahl x gibt jeweils die Wegverlängerung gegenüber dem senkrechten Durchtritt durch die Atmosphäre an (hier für den Standort Berlin, nach [Qua15])

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 sogenannte **Direktstrahlung** an. Allerdings entsteht durch die Streuung von Licht in der Atmosphäre ein weiterer Strahlungsanteil: die **Diffusstrahlung** (siehe Bild 2.4).

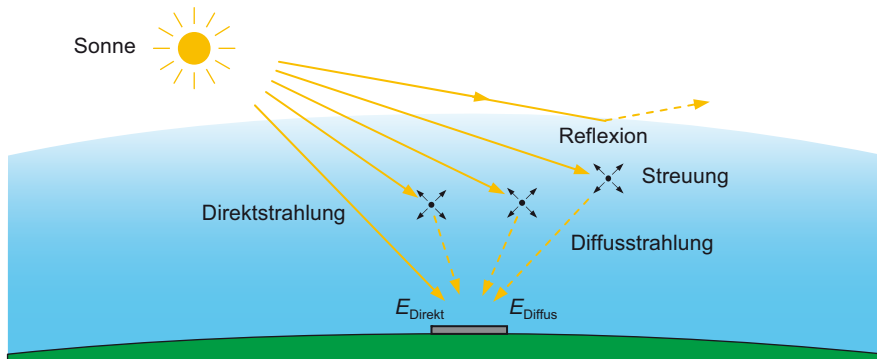


Bild 2.4 Entstehung der Globalstrahlung: Sie ergibt sich aus der Summe von Direkt- und Diffusstrahlung

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 kom-

men. 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.

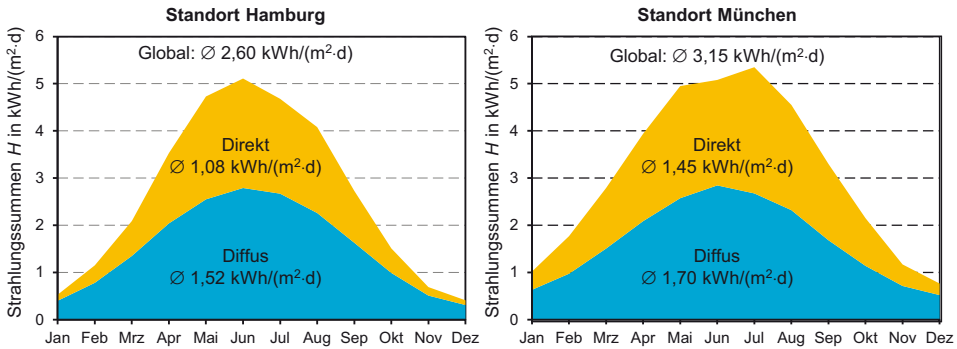


Bild 2.5 Strahlungssummen über das Jahr auf eine horizontale Ebene für die Standorte Hamburg und München

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-

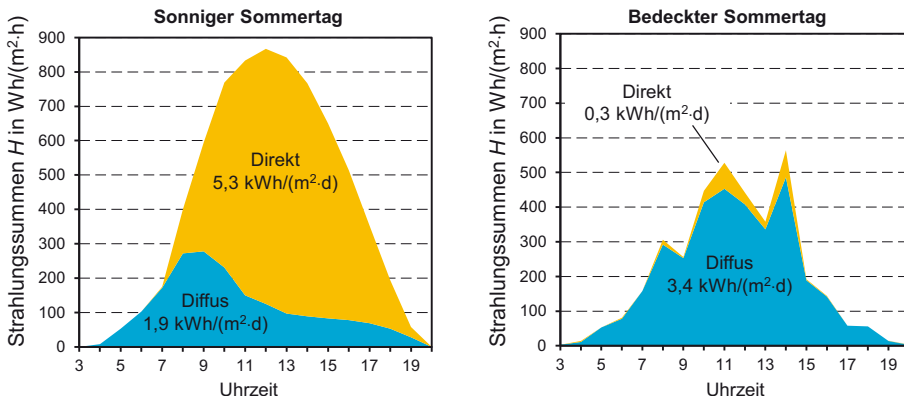


Bild 2.6 Stunden-Strahlungssummen an zwei Sommertagen in Braunschweig: Der bedeckte Tag erbringt immerhin gut die Hälfte der Strahlungsenergie des sonnigen Tages [Pal98]

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**.

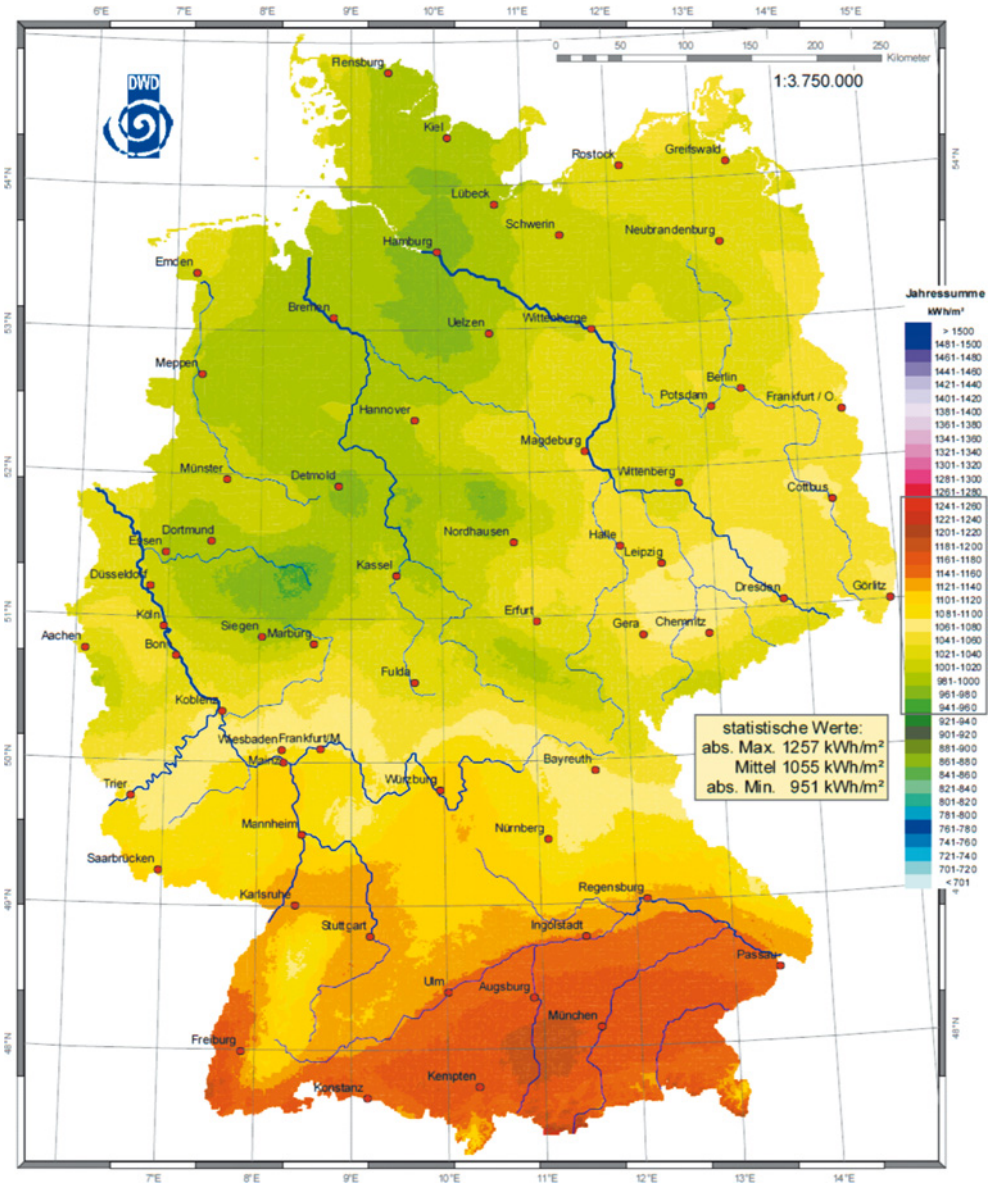


Bild 2.7 Globalstrahlungssummen in Deutschland [DWD]

2.3 Berechnung des Sonnenstandes

2.3.1 Sonnendeklination

Die Erde läuft innerhalb eines Jahres auf einer fast perfekten Kreisbahn um die Sonne. Da die Erdachse geneigt ist, ändert sich die Sonnenhöhe im Laufe des Jahres. Bild 2.10 zeigt diesen Zusammenhang für die Sommer- und Wintersonnenwende.

Global horizontal irradiation

Europe

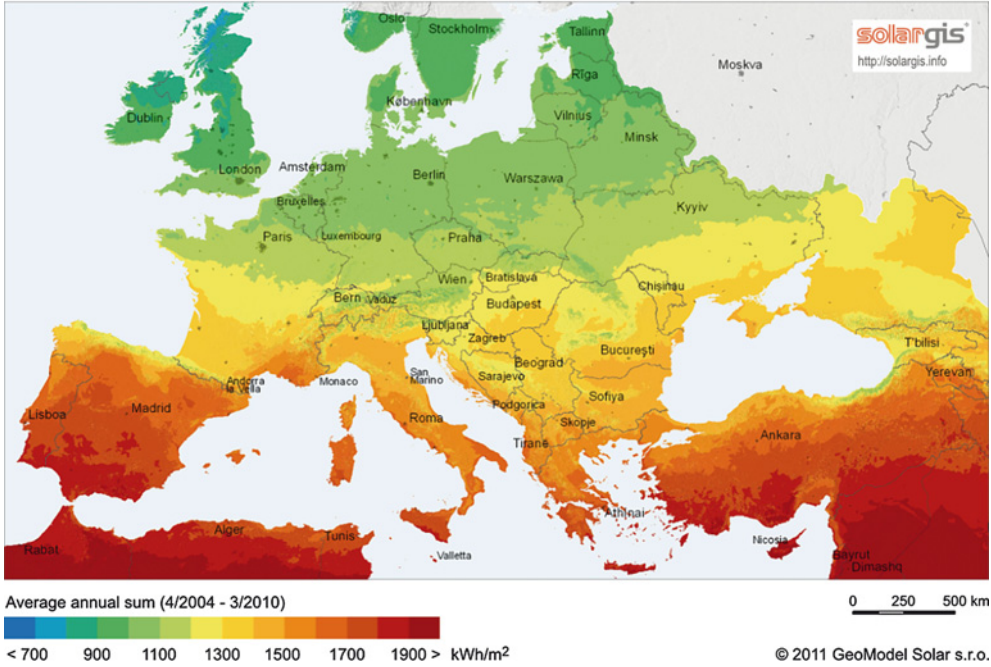


Bild 2.8 Globalstrahlungskarte von Europa: Die Strahlungssummen liegen zwischen 700 kWh/(m² · a) in Schottland und rund 1800 kWh/(m² · a) in Südspanien [solargis.info]

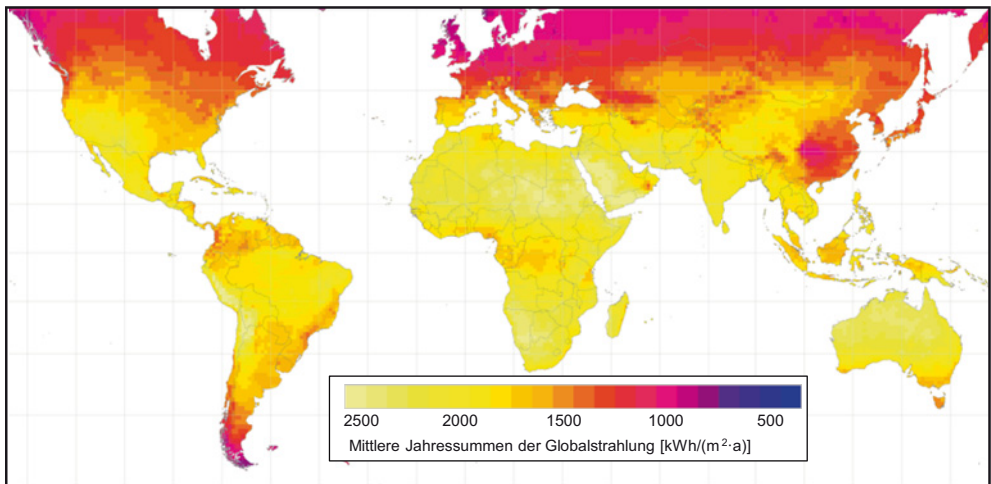


Bild 2.9 Weltkarte der Globalstrahlungssummen [erstellt mit Meteonorm, www.meteonorm.com]

Im Sommer ist der Nordpol der Erdachse der Sonne zugeneigt, so dass sich große Sonnenhöhenwinkel (oft auch kurz als **Sonnenhöhe** bezeichnet) ergeben. Durch einfache Winkelbetrachtungen lässt sich die maximale Sonnenhöhe γ_{S_Max} (mittags um 12 Uhr) bestimmen durch

$$\gamma_{S_Max} = 113,4^\circ - \varphi. \tag{2.5}$$

Der Winkel φ gibt dabei die **geografische Breite** (Breitengrad) des betrachteten Standorts an. Zur **Wintersonnenwende** ist es genau umgekehrt, die Erdachse ist der Sonne abgewandt, folglich ergibt sich nun eine mittägliche Sonnenhöhe von

$$\gamma_{S_Min} = 66,6^\circ - \varphi. \tag{2.6}$$

Beispiel 2.1 Sonnenhöhe am Standort Münster

Sie wollen eine PV-Anlage am Standort Münster (Breitengrad $\varphi = 52^\circ$) errichten. Mitte Juni ergibt sich mittags eine Sonnenhöhe von $113,4^\circ - 52^\circ = 61,4^\circ$. Mitte Dezember liegt dieser Wert dagegen bei $66,6^\circ - 52^\circ = 14,6^\circ$.



Für die Planung von Photovoltaikanlagen ist insbesondere die Sonnenhöhe zur Wintersonnenwende wichtig.

Eine Photovoltaikanlage sollte möglichst so aufgebaut werden, dass auch am kürzesten Tag des Jahres (21.12.) zur Mittagszeit keine Verschattung auftritt.

Bild 2.10 zeigt nur die beiden Extremfälle der **Sonnendeklination** δ . Darunter verstehen wir den jeweiligen Neigungswinkel der Erdachse in Richtung der Sonne. Über das Jahr ändert er

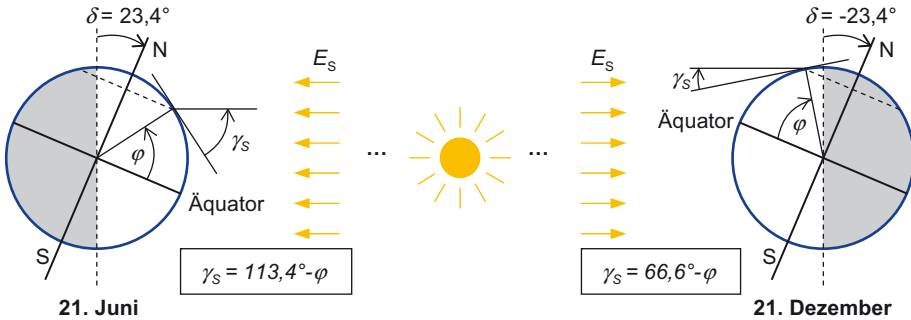


Bild 2.10 Einfluss der Erdachsenverkipfung auf die mittägliche Sonnenhöhe γ_{S_Max} zur Sommer- und Wintersonnenwende: Je nach Breitengrad φ ergibt sich ein anderer Wert

Index

1000-Dächer-Programm 38

A

Aachener Modell 39
Absorption 65, 81
Absorptionskoeffizient 82, 84, 85, 94, 133
Absorptionswirkungsgrad 97
Air Mass 42, 43
Albedo 56
Amortisationszeit 310
Anlagenmonitoring 314
Anlagenvisualisierung 314
Anode 237
Antireflexbeschichtung 86, 92, 115, 117
Arbeit 22
a-Si 133
Auslegungsfaktor 215
Autarkiegrad 201, 252

B

Back-Surface-Field 96, 119, 121, 130
Bändermodell 68
Bandabstand 68, 78, 81, 106, 110, 142
Banddiagramm 77
Bandlücke 68, 70
Bandlückenwellenlänge 110, 111
Basis 92, 95, 130, 131
Bestrahlungsstärke 42, 90, 101
Betonfundament 185
Betriebskosten 310
Beweglichkeit 71, 136
Biomasse 326
Bleiakku 227, 352
Blei-Säure-Akku 227
Blindleistung 220
Blindleistungsbereitstellung 220
Bohrsches Atommodell 64
Bohrsches Postulat 64

Boost Converter 197
Brechungsindex 85
Brick 126
Buck Converter 195
Buried-Contact 117–119
Busbar 93, 117
Bypassdioden 167, 176, 282
Bypassing 240

C

Cadmium-Tellurid (CdTe) 67, 155
CCCV 239, 352
CdTe 67, 84, 155, 156, 174
CID 240, 366
Cloud Enhancements 45
c-Si 82
Current Interrupt Device 240
Current Matching 138
Czochralski-Verfahren 36, 125

D

Dangling Bonds 133, 137
DC/DC-Wandler 194
Dead Layer 94, 122
Degradation 131, 137, 139, 205, 313, 320
Depth of Discharge 229
Diffusionslänge 80, 93, 94, 120
Diffusionsspannung 76, 77, 79, 81
Diffusionsstrom 73, 77, 107
Diffusionszelle 136
Diffusstrahlung 44, 55, 154, 275
Dioden-Kennlinie 80
direkter Halbleiter 83
Direktstrahlung 44, 45, 54, 274
DoD 229, 254, 255
Dotierung 33, 74, 77, 94, 118
Dreikomponentenmodell 53, 306
Driftgeschwindigkeit 71

Driftstrom 71
 Driftzelle 136
 DSM 344
 Dünnschichtmodule 140, 174
 Dünnschichtzelle 133, 135, 136, 142
 Dunkelkennlinien 295
 Dunkelstrom 91

E

EEG 33, 39, 309, 312
 effektive Zustandsdichte 71, 78
 EFG 128
 Eigenleitungsichte 70, 103, 114, 213
 Eigenverbrauch 225
 Eigenverbrauchsanteil 251
 Eigenverbrauchsquote 200, 225, 251, 312
 Eigenverschattungen 305
 Einspeisemanagement 219
 Einspeisevarianten 200
 Einspeisevergütung 200, 310
 Electronic Grade 124
 Elektrolumineszenz-Messtechnik 284
 Emittter 92, 94, 118, 130, 131
 – lokaler 120
 Empfindlichkeit, spektrale 98, 122
 Endenergie 23
 End-Ertrag 315
 Energie 21
 Energiebänder 68
 Energiemanagementsystem 253, 256, 260, 262
 Energierücklaufzeit 158
 Entladetiefe 229, 238, 241, 244, 253
 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 33, 39, 309
 Erntefaktor 159
 Ersatzschaltbild 91, 100
 Ertrag, spezifischer 35, 310
 Ertragswirkungsgrad 326
 Erzeugerzählpeilsystem 99, 164
 europäischer Wirkungsgrad 212
 EVA 131, 140, 156, 168

F

Farbstoffsolarzelle 150
 Fassadenanlagen 190
 Feldstrom 71, 136
 Fermidifferenzen 78
 Flachdachanlagen 187
 Flächennutzungsgrad 305
 Float-Zone-Verfahren 126
 Flussbettreaktor 124, 160
 Foliensilizium 128
 Freilandanlagen 185
 Freilaufdiode 196
 Fresnel-Linsen 151
 Fresnelsche Formeln 88
 Füllfaktor 102, 114, 174

G

GaAs 37, 67, 84, 149
 GaN 213
 Generatoranschlusskasten 181, 183, 202
 Generatorverluste 315
 Gesamtwirkungsgrad 214
 Globalstrahlung 44, 60, 154, 271
 Globalstrahlungssensoren 271
 Grätzel-Zelle 150

H

Halbleiter 64, 69
 – direkter 83
 – indirekter 83
 HIT-Zelle 148
 Hocheffizienzellen 119
 Hochsetzsteller 197
 Hotspots 169, 176
 hybride Waferzellen 147

I

IBC-Zelle 120
 Idealitätsfaktor 100, 107
 indirekter Halbleiter 83
 Ingot 125, 156
 integrierte Serienschaltung 140
 Interdigitated Back Contact 120

Interkalation 237
 Interkalationsmaterial 238
 Investitionskosten 310
 Isolationsüberwachung 203
 Isolator 69
 ITO 135

J

Jahreswirkungsgrad 215

K

Kabelverluste 184, 307
 Kathode 237
 Kernschatten 303
 Klimawandel 27
 Konzentratorsystem 151, 158
 Kurzschlussstrom 101

L

Lawinendurchbruch 81, 165
 Leerlaufspannung 101
 Leiter 69
 Leitungsband 68
 Lichtabsorption 81
 Light Trapping 118, 119, 121, 137, 139
 lokaler Emittter 120
 Lückbetrieb 197

M

Maxeon-Zelle 120
 Maximum Power Point 101
 metallurgisches Silizium 123
 mikromorph 139
 Minutenreserve 333
 Mismatching 178, 202, 209, 275, 316
 Modul-Wechselrichter 202
 Monitoring 314
 monokristallin 115, 125, 126
 MOSFET 195
 MPP-Tracker 199, 209
 multikristallin 126, 127

N

Nachführung 59, 154, 186
 NaS 242
 Natrium-Schwefel 242, 353
 Netzbetreiber 219, 223
 Netzkopplung 301
 Niederspannungsrichtlinie 223
 NOCT 174, 177

O

Objektrendite 311
 Ortszeit, wahre 51, 52

P

Parallelschaltung 165
 Parallelwiderstand 105, 108, 173, 277
 Peakleistungsmessung 278
 PECVD 134
 PERC-Zelle 121, 122
 Performance Ratio 316
 PERL-Zelle 121
 Personenschutz 203
 Photodiode 90, 92, 274
 Photostrom 90, 96
 Photovoltaik 32
 PID 205, 290, 354
 pin-Zelle 135, 140
 pn-Übergang 33, 75, 76, 78, 79, 90
 polykristallin 127
 Polysilizium 123, 156, 158
 Potentialstufe 78
 Power-to-Gas 343
 Primärenergie 23, 24, 30, 158, 159
 Primärenergiebedarf 26, 61, 323
 Primärenergiefaktor 158
 Primärregelung 333
 Punktkontakt-Zelle 120, 131, 153
 Pyranometer 271

Q

Quantenwirkungsgrad 98, 122, 138

R

Rammfundament 185
 Raumladungszone 77, 90, 92, 94, 95, 106, 135
 Rayleigh-Streuung 43
 Recycling 155, 156, 161
 Redox-Flow 245, 353
 Redoxreaktion 227, 228
 Referenz-Ertrag 315
 Reflexionsfaktor 56, 85, 88, 97, 116–118, 121
 Regelenergie 333
 Reihenschaltung 166
 Rekombination 70, 93
 Rückseitenfolie 284
 Runaway 239

S

Sabatier-Prozess 343
 Sättigungsstrom 80, 92, 103, 114
 Sahara-Wunder 61
 Schleusenspannung 81, 167
 Schrägdachanlagen 188
 Schraubfundament 185
 Schwachlichtverhalten 172, 277, 306
 Sekundärenergie 23
 Sekundärregelung 333
 Serienverschaltung, integrierte 140
 Serienwiderstand 105, 109, 129, 277
 Shockley-Gleichung 80, 91, 106
 Shutdown 239
 SiC 213
 Siebdruck 129
 Siemens-Reaktor 124
 Silizium 33, 66, 67, 123
 – metallurgisches 123
 Simulationsprogramme 306
 Sizing Ratio 215
 Smart Meter 344
 SoC 379
 Solar-Grade 124
 Solarkonstante 41, 42

Solarmodul 33, 107, 131, 132, 164
 Solarzelle 33, 36, 92, 94
 Solarzellensymbol 100
 Sonnenazimuth 52
 Sonnenbahndiagramm 52, 303
 Sonnenbahnindikator 302
 Sonnendeklination 48, 51, 53
 Sonnenhöhe 52
 Sonnenhöhenwinkel 43
 Sonnenstandsnachführung 154
 spektrale Empfindlichkeit 98, 122
 spektraler Wirkungsgrad 110, 114
 spezifischer Ertrag 35, 310
 Staebler-Wronski-Effekt 137
 Standard-Ersatzschaltbild 105
 Standardtestbedingungen 34, 44
 Stapelfehler 291
 Stapelzelle 138, 149
 State of Charge 379
 STC 34
 Strahlungs Bündelung 151
 Strang 33, 131
 String 33, 131, 177
 Stringdioden 177, 181, 182
 String-Dunkelkennlinien 295
 String-Ribbon 129
 Stringsicherungen 177
 String-Wechselrichter 202
 Stromerzeugungspotential 325
 Substrat-Zelle 138
 Superstrat 135, 205
 Superstrat-Zelle 135, 205
 Systemverluste 316
 Systemwirkungsgrad 62, 325

T

Tandemzelle 138
 Tastgrad 196
 TCO 135
 Tedlar-Folie 131
 Temperaturabhängigkeit 103, 104
 Temperaturkoeffizient 103, 104, 141, 173
 Temperaturverhalten 173
 Texturierung 115, 117, 118, 121, 129, 137
 theoretischer Wirkungsgrad 114, 115
 Thermal Runaway 239, 243

Thermalisierungsverluste 111
Thermographie-Messtechnik 280
Tiefsetzsteller 195
Transmissionsverluste 110, 136
Treibhauseffekt 28, 29
Trichlorsilan 123
Tripelzelle 138

U

Umwandlungswirkungsgrad 210, 211

V

Valenzband 68
Vanadium-Redox-Flow 246
Verbindungshalbleiter 67
Verbraucherzählpeilsystem 91, 171, 178
Verschattungsanalyse 302
Verschattungsverluste 117, 167, 179, 307
VisiKid 317
Volllaststunden 47, 315
VRF 246

W

Wafer 127, 129, 131, 155, 160
Waferzellen, hybride 147
wahre Ortszeit 51, 52
Watt-Peak 34
Wechselrichter 34, 203
Wechselrichterwirkungsgrad 213
Wirkungsgrad 34, 102, 110, 126, 152, 162,
207, 210
– europäischer 212
– spektraler 110, 114
– theoretischer 114, 115

Z

Zentral-Wechselrichter 201
Zustandsdichte, effektive 71, 78
Zwei-Dioden-Ersatzschaltbild 109
Zwei-Dioden-Modell 106