

# Inhalt

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b> .....                                   | <b>19</b> |
| 1.1      | Einleitung .....  | 19        |
| 1.1.1    | Wozu Photovoltaik? .....                                  | 19        |
| 1.1.2    | Für wen ist dieses Buch gedacht? .....                    | 20        |
| 1.1.3    | Aufbau des Buches .....                                   | 20        |
| 1.2      | Was ist Energie? .....                                    | 21        |
| 1.2.1    | Definition der Energie .....                              | 21        |
| 1.2.2    | Einheiten der Energie .....                               | 23        |
| 1.2.3    | Primär-, Sekundär- und Endenergie .....                   | 23        |
| 1.2.4    | Energieinhalte verschiedener Stoffe .....                 | 24        |
| 1.3      | Probleme der heutigen Energieversorgung .....             | 25        |
| 1.3.1    | Wachsender Energiebedarf .....                            | 25        |
| 1.3.2    | Verknappung der Ressourcen .....                          | 26        |
| 1.3.3    | Klimawandel .....   | 27        |
| 1.3.4    | Gefährdung und Entsorgung .....                           | 29        |
| 1.4      | Erneuerbare Energien .....                                | 30        |
| 1.4.1    | Die Familie der erneuerbaren Energien .....               | 30        |
| 1.4.2    | Vor- und Nachteile von erneuerbaren Energien .....        | 31        |
| 1.4.3    | Bisherige Entwicklung der erneuerbaren Energien .....     | 31        |
| 1.5      | Photovoltaik – das Wichtigste in Kürze .....              | 32        |
| 1.5.1    | Was bedeutet „Photovoltaik“? .....                        | 32        |
| 1.5.2    | Was sind Solarzellen und Solarmodule? .....               | 32        |
| 1.5.3    | Wie ist eine typische Photovoltaikanlage aufgebaut? ..... | 33        |
| 1.5.4    | Was „bringt“ eine Photovoltaikanlage? .....               | 34        |
| 1.6      | Geschichte der Photovoltaik .....                         | 35        |
| 1.6.1    | Wie alles begann .....                                    | 35        |
| 1.6.2    | Die ersten echten Solarzellen .....                       | 36        |
| 1.6.3    | From Space to Earth .....                                 | 38        |
| 1.6.4    | Vom Spielzeug zur Energiequelle .....                     | 39        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>2</b> | <b>Strahlungsangebot der Sonne</b> .....                  | <b>41</b> |
| 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        |
| <b>3</b> | <b>Grundlagen der Halbleiterphysik</b> .....              | <b>64</b> |
| 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        |
| <b>4</b> | <b>Aufbau und Wirkungsweise der Solarzelle .....</b> | <b>90</b> |
| 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 $\eta$ .....                            | 102       |
| 4.4.6    | Temperaturabhängigkeit der Solarzelle .....          | 103       |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.5      | Elektrische Beschreibung realer Solarzellen .....     | 105        |
| 4.5.1    | Vereinfachtes Modell .....                            | 105        |
| 4.5.2    | Standard-Modell (Ein-Dioden-Modell) .....             | 105        |
| 4.5.3    | Zwei-Dioden-Modell .....                              | 106        |
| 4.5.4    | Bestimmung der Parameter des Ersatzschaltbildes ..... | 107        |
| 4.6      | Betrachtungen zum Wirkungsgrad .....                  | 110        |
| 4.6.1    | Spektraler Wirkungsgrad .....                         | 110        |
| 4.6.2    | Theoretischer Wirkungsgrad .....                      | 114        |
| 4.6.3    | Verluste in der realen Solarzelle .....               | 115        |
| 4.6.3.1  | Optische Verluste .....                               | 115        |
| 4.6.3.2  | Elektrische Verluste .....                            | 118        |
| 4.7      | Hocheffizienzzellen .....                             | 119        |
| 4.7.1    | Buried-Contact-Zelle .....                            | 119        |
| 4.7.2    | Punktkontakt-Zelle (IBC-Zelle) .....                  | 120        |
| 4.7.3    | PERL-, PERC- und TOPCon-Zelle .....                   | 121        |
| <b>5</b> | <b>Zellentechnologien .....</b>                       | <b>124</b> |
| 5.1      | Herstellung kristalliner Silizium-Zellen .....        | 124        |
| 5.1.1    | Vom Sand zum Silizium .....                           | 124        |
| 5.1.1.1  | Herstellung von Polysilizium .....                    | 124        |
| 5.1.1.2  | Herstellung von monokristallinem Silizium .....       | 126        |
| 5.1.1.3  | Herstellung von multikristallinem Silizium .....      | 127        |
| 5.1.1.4  | Herstellung von quasimonokristallinem Silizium .....  | 128        |
| 5.1.2    | Vom Silizium zum Wafer .....                          | 128        |
| 5.1.2.1  | Waferherstellung .....                                | 128        |
| 5.1.2.2  | Wafer aus Foliensilizium .....                        | 129        |
| 5.1.3    | Herstellung von Standard-Solarzellen .....            | 130        |
| 5.1.4    | Herstellung von Solarmodulen .....                    | 132        |
| 5.2      | Zellen aus amorphem Silizium .....                    | 134        |
| 5.2.1    | Eigenschaften von amorphem Silizium .....             | 134        |
| 5.2.2    | Herstellungsverfahren .....                           | 135        |
| 5.2.3    | Aufbau der pin-Zelle .....                            | 136        |
| 5.2.4    | Staebler-Wronski-Effekt .....                         | 137        |
| 5.2.5    | Stapelzellen .....                                    | 139        |
| 5.2.6    | Kombizellen aus mikromorphem Material .....           | 140        |
| 5.2.7    | Integrierte Serienverschaltung .....                  | 141        |

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

## **6 Solarmodule und Solargeneratoren ..... 169**

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.1   | Eigenschaften von Solarmodulen.....                | 169 |
| 6.1.1 | Solarzellenkennlinie in allen vier Quadranten..... | 169 |
| 6.1.2 | Parallelschaltung von Zellen.....                  | 170 |
| 6.1.3 | Reihenschaltung von Zellen.....                    | 171 |

---

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

---

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

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



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

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 9.2       | Leistungsmessung von Solarmodulen .....                         | 300        |
| 9.2.1     | Aufbau eines Solarmodul-Leistungsprüfstands .....               | 300        |
| 9.2.2     | Güteklassen von Modulflashern .....                             | 301        |
| 9.2.3     | Bestimmung der Modulparameter .....                             | 302        |
| 9.3       | Peakleistungsmessung vor Ort .....                              | 303        |
| 9.3.1     | Prinzip der Peakleistungsmessung .....                          | 303        |
| 9.3.2     | Möglichkeiten und Grenzen des Messprinzips .....                | 304        |
| 9.4       | Thermographie-Messtechnik .....                                 | 305        |
| 9.4.1     | Prinzip der Infrarot-Temperaturmessung .....                    | 305        |
| 9.4.2     | Hell-Thermographie von Solarmodulen .....                       | 306        |
| 9.4.3     | Dunkel-Thermographie .....                                      | 308        |
| 9.5       | Elektrolumineszenz-Messtechnik .....                            | 309        |
| 9.5.1     | Messprinzip .....   | 309        |
| 9.5.2     | Beispiele von Aufnahmen .....                                   | 310        |
| 9.5.3     | LowCost-Outdoor-Elektrolumineszenz-Untersuchungen .....         | 313        |
| 9.6       | Untersuchungen zur spannungsinduzierten Degradation (PID) ..... | 315        |
| 9.6.1     | Erklärung des PID-Effektes .....                                | 316        |
| 9.6.2     | Prüfung von Modulen auf PID .....                               | 317        |
| 9.6.3     | EL-Untersuchungen zu PID .....                                  | 319        |
| 9.7       | String-Dunkelkennlinien-Technik .....                           | 320        |
| 9.7.1     | Motivation .....  | 320        |
| 9.7.2     | Messmethode .....   | 321        |
| 9.7.3     | Detektion von PID .....   | 321        |
| 9.7.4     | Detektion von defekten Bypassdioden und Zellverbindern .....    | 322        |
| 9.7.5     | Fazit .....   | 325        |
| <b>10</b> | <b>Planung und Betrieb netzgekoppelter Anlagen .....</b>        | <b>326</b> |
| 10.1      | Planung und Dimensionierung .....                               | 326        |
| 10.1.1    | Standortwahl .....  | 326        |
| 10.1.2    | Verschattungen .....  | 327        |
| 10.1.2.1  | Verschattungsanalyse .....                                      | 327        |
| 10.1.2.2  | Nahverschattungen .....   | 328        |
| 10.1.2.3  | Eigenverschattungen .....                                       | 330        |
| 10.1.2.4  | Optimierte Stringverschaltung .....                             | 331        |
| 10.1.3    | Anlagendimensionierung mit Simulationsprogrammen .....          | 331        |
| 10.1.3.1  | Wechselrichter-Auslegungstools .....                            | 331        |
| 10.1.3.2  | Simulationsprogramme für Photovoltaikanlagen .....              | 331        |

|   |            |
|---|------------|
| 10.2 Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen .....               | 334        |
| 10.2.1 Das Erneuerbare-Energien-Gesetz .....                        | 334        |
| 10.2.2 Renditeberechnung.....                                       | 334        |
| 10.2.2.1 Eingangsgrößen .....                                       | 334        |
| 10.2.2.2 Amortisationszeit.....                                     | 335        |
| 10.2.2.3 Objektrendite .....  | 336        |
| 10.2.2.4 Renditeerhöhung durch Eigenverbrauch des Solarstroms ..... | 337        |
| 10.2.2.5 Weitere Einflussgrößen .....                               | 338        |
| 10.3 Überwachung, Monitoring und Visualisierung.....                | 338        |
| 10.3.1 Methoden zur Anlagenüberwachung .....                        | 339        |
| 10.3.2 Monitoring von PV-Anlagen .....                              | 339        |
| 10.3.2.1 Spezifische Erträge .....                                  | 339        |
| 10.3.2.2 Verluste .....   | 340        |
| 10.3.2.3 Performance Ratio .....                                    | 341        |
| 10.3.2.4 Konkrete Maßnahmen zum Monitoring .....                    | 341        |
| 10.3.3 Visualisierung .....   | 342        |
| 10.4 Betriebsergebnisse von konkreten Anlagen.....                  | 343        |
| 10.4.1 Schrägdachanlage aus dem Jahre 1996 .....                    | 343        |
| 10.4.2 Schrägdachanlage aus dem Jahre 2002 .....                    | 345        |
| 10.4.3 Flachdachanlage aus dem Jahre 2008 .....                     | 346        |
| <b>11 Zukünftige Entwicklung.....</b>                               | <b>348</b> |
| 11.1 Potential der Photovoltaik .....                               | 348        |
| 11.1.1 Theoretisches Potential .....                                | 348        |
| 11.1.2 Technisch nutzbare Strahlungsenergie .....                   | 348        |
| 11.1.3 Technisches Stromerzeugungspotential.....                    | 350        |
| 11.1.4 Photovoltaik versus Biomasse.....                            | 351        |
| 11.2 Effiziente Förderinstrumente .....                             | 352        |
| 11.3 Preis- und Vergütungsentwicklung.....                          | 354        |
| 11.3.1 Preisentwicklung von Solarmodulen.....                       | 354        |
| 11.3.2 Entwicklung der Einspeisevergütung .....                     | 355        |
| 11.4 Erneuerbare Energien im heutigen Stromversorgungssystem .....  | 356        |
| 11.4.1 Struktur der Stromerzeugung .....                            | 357        |
| 11.4.2 Kraftwerksarten und Regelenergie .....                       | 358        |
| 11.4.3 Zusammenspiel aus Sonne und Wind .....                       | 359        |
| 11.4.4 Exemplarische Stromproduktionsverläufe .....                 | 361        |

---

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