

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 | Eigenleitungsichte | 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 Eingangsgrößen | 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 |