

Dr. Hans Kurt Köthe

---

# ***Stromversorgung mit Solarzellen***

---

Methoden und Anlagen  
für die Energieaufbereitung

Mit 260 Abbildungen und 34 Tabellen  
4., verbesserte Auflage

***Franzis'***

# Inhalt

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>                                       | <b>15</b> |
| <b>2</b> | <b>Das Licht – Quelle der solarelektrischen Energie</b> | <b>20</b> |
| 2.1      | Das Licht als Energieträger                             | 20        |
| 2.2      | Meßtechnische Erfassung des Lichtes                     | 23        |
| 2.2.1    | Definitionen und Einheiten                              | 23        |
| 2.2.2    | Grundlagen der Meßtechnik                               | 25        |
| 2.2.3    | Vermessung der Sonnenstrahlen                           | 28        |
| 2.3      | Verfolgung des Sonnenstandes im Jahresverlauf           | 31        |
| 2.4      | Strahlungsmeßdaten der Wetterbeobachtungsstationen      | 32        |
| 2.5      | Auswertung der Meßdaten für photovoltaische Zwecke      | 32        |
| 2.6      | Einflüsse von Bewölkung und Nachführung                 | 35        |
| <b>3</b> | <b>Solarzellen und Solargeneratoren</b>                 | <b>38</b> |
| 3.1      | Aufbau von Solarzellen                                  | 38        |
| 3.2      | Herstellung von Solarzellen                             | 38        |
| 3.3      | Etwas Solarzellentheorie                                | 39        |
| 3.4      | Kennlinien von Solarzellen                              | 44        |
| 3.4.1    | Dunkelkennlinie   | 44        |
| 3.4.2    | Kennlinie der bestrahlten Solarzelle                    | 44        |
| 3.4.3    | Arbeitspunkt von Solarzellen                            | 47        |
| 3.4.4    | MPP-Tracking  | 48        |
| 3.4.5    | Füllfaktor  | 48        |
| 3.4.6    | Umwandlungswirkungsgrad                                 | 49        |
| 3.5      | Solarzellenmodule                                       | 50        |
| 3.5.1    | Modulaufbau   | 50        |
| 3.5.2    | Prüfung von Solarzellenmodulen                          | 52        |
| 3.6      | Selbstbau von Solarzellenmodulen                        | 53        |
| 3.6.1    | Beschaffung der Solarzellen                             | 53        |
| 3.6.2    | Vermessung der Solarzellen                              | 53        |
| 3.6.3    | Verschalten und Einbetten von Solarzellen               | 55        |
| 3.6.3.1  | Verschalten   | 55        |
| 3.6.3.2  | Montage   | 56        |
| 3.6.3.3  | Einbau von Schutzdioden                                 | 56        |
| 3.7      | Montage von Solarzellenmodulen                          | 60        |
| 3.7.1    | Gestellmontage  | 60        |
| 3.7.2    | Dachmontage   | 60        |
| 3.7.2.1  | Gewächshausdach-Montage                                 | 61        |
| 3.7.2.2  | Sparrendach-Montage                                     | 63        |
| 3.7.3    | Fassadenmontage   | 65        |
| 3.7.4    | Mastmontage und Seilnetzaufständerung                   | 66        |

## Inhalt

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>4</b> | <b>Photovoltaische Systeme: Aufbau und Auslegung</b>                     | <b>68</b> |
| 4.1      | Systembegriff  | 68        |
| 4.2      | Der Systemaufbau   | 69        |
| 4.3      | Systeme im Inselbetrieb  | 71        |
| 4.3.1    | Aufbau und Struktur der Verbraucher                                      | 71        |
| 4.3.1.1  | Systeme ohne Hilfsenergiequelle  | 71        |
| 4.3.1.2  | Systeme mit Hilfsenergiequelle   | 77        |
| 4.3.2    | Auslegung von photovoltaischen Systemen für den Inselbetrieb             | 78        |
| 4.3.2.1  | Systeme ohne Hilfsenergiequelle  | 78        |
| 4.3.2.2  | Photovoltaische Systeme mit einer zweiten, dauernd aktiven Energiequelle | 89        |
| 4.3.2.3  | Systeme mit abrufbarer Hilfsenergiequelle                                | 90        |
| 4.4      | Systeme mit Netzankopplung   | 92        |
| <b>5</b> | <b>Energiespeicher für photovoltaische Systeme</b>                       | <b>96</b> |
| 5.1      | Übersicht  | 96        |
| 5.2      | Allgemeine Akkumulator-Terminologie                                      | 97        |
| 5.3      | Akkumulator-Ausführungen   | 104       |
| 5.3.1    | Allgemeines  | 104       |
| 5.3.2    | Bauarten und Baureihen   | 105       |
| 5.3.3    | Elektrochemisch wirksame Bestandteile der Zellen                         | 108       |
| 5.3.4    | Handelsübliche Batterieausführungen und deren Eigenschaften              | 110       |
| 5.4      | Betriebsverhalten handelsüblicher Bleiakumulatoren                       | 111       |
| 5.4.1    | Elektrochemische Vorgänge  | 111       |
| 5.4.2    | Lade-/Entlade-Verhalten handelsüblicher Bleiakumulatoren                 | 112       |
| 5.4.2.1  | Verschlossene Zellen   | 112       |
| 5.4.2.2  | Geschlossene Zellen  | 115       |
| 5.4.3    | Temperatureinfluß bei Bleiakumulatoren                                   | 120       |
| 5.5      | Betriebsverhalten handelsüblicher Ni/Cd-Akkumulatoren                    | 122       |
| 5.5.1    | Elektrochemische Vorgänge  | 122       |
| 5.5.2    | Lade-/Entlade-Verhalten handelsüblicher Ni/Cd-Akkumulatoren              | 123       |
| 5.5.2.1  | Gasdichte Zellen   | 123       |
| 5.5.2.2  | Geschlossene Zellen  | 129       |
| 5.5.3    | Temperatureinfluß bei Ni/Cd-Akkumulatoren                                | 130       |
| 5.6      | Auswahl von Batterien für photovoltaische Anwendungen                    | 132       |
| 5.7      | Anwendung von nicht-gasdichten Blei- und Ni/Cd-Akkumulatoren             | 136       |
| 5.7.1    | Der Weg zum vollständigen Laden  | 136       |
| 5.7.2    | Beeinflussung des Ladevorgangs über die Speicherdimensionierung          | 141       |
| 5.7.2.1  | Vorbemerkung   | 141       |
| 5.7.2.2  | Systeme mit Bleiakumulatoren   | 141       |
| 5.7.2.3  | Systeme mit Ni/Cd-Akkumulatoren  | 145       |
| 5.7.3    | Laden und Spannungsbegrenzung bei Zwillingsbatterien                     | 145       |
| 5.7.4    | Laden mit Strompulsen, Zellenimpedanz                                    | 147       |
| 5.8      | Batterieanlagen  | 149       |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.8.1    | Allgemeines  | 149        |
| 5.8.2    | Fußböden und Wandanstriche   | 150        |
| 5.8.2.1  | Bleiakkumulator-Räume  | 150        |
| 5.8.2.2  | Ni/Cd-Akkumulator-Räume  | 151        |
| 5.8.3    | Belüftung  | 151        |
| 5.8.4    | Batterieaufstellung  | 153        |
| <b>6</b> | <b>Bauelemente und Grundsaltungen<br/>für die Systemelektronik</b> | <b>154</b> |
| 6.1      | Allgemeine Gesichtspunkte  | 154        |
| 6.2      | Passive Bauelemente  | 155        |
| 6.2.1    | Widerstände  | 155        |
| 6.2.1.1  | Leitungswiderstände, Querschnitt                                   | 155        |
| 6.2.1.2  | Festwiderstände  | 156        |
| 6.2.1.3  | Potentiometer  | 156        |
| 6.2.1.4  | Lineare Temperatur-Meßwiderstände                                  | 156        |
| 6.2.1.5  | Kalt- und Heißleiter   | 159        |
| 6.2.1.6  | Spannungsabhängige Widerstände                                     | 160        |
| 6.2.1.7  | Lichtempfindliche Widerstände                                      | 160        |
| 6.2.2    | Kondensatoren  | 162        |
| 6.2.3    | Induktivitäten   | 164        |
| 6.2.4    | Dioden   | 164        |
| 6.2.4.1  | Aufbau und Wirkungsweise   | 165        |
| 6.2.4.2  | Gleichrichterdioden  | 165        |
| 6.2.4.3  | Z-Dioden   | 166        |
| 6.2.4.4  | Photodioden  | 168        |
| 6.2.4.5  | Leuchtdioden   | 169        |
| 6.2.5    | Relais und Schütze   | 169        |
| 6.2.5.1  | Elektromagnetische Relais  | 169        |
| 6.2.5.2  | Schütze  | 174        |
| 6.2.5.3  | Elektrothermische Relais   | 175        |
| 6.2.5.4  | Elektronische Relais   | 175        |
| 6.3      | Transistoren   | 177        |
| 6.3.1    | Bipolare Transistoren  | 177        |
| 6.3.1.1  | Aufbau und Arbeitsweise  | 178        |
| 6.3.1.2  | Grundsaltungen   | 179        |
| 6.3.2    | Feldeffekt-Transistoren  | 185        |
| 6.3.2.1  | Sperrschicht-FETs (JFETs)  | 186        |
| 6.3.2.2  | MOSFETs  | 188        |
| 6.4      | Integrierte Schaltungen  | 190        |
| 6.4.1    | Referenzspannungen   | 190        |
| 6.4.2    | Spannungsregler  | 192        |
| 6.4.3    | Spannungsvervielfacher   | 192        |
| 6.4.4    | Komparatoren   | 193        |

## Inhalt

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.4.5    | Operationsverstärker  | 196        |
| 6.4.6    | Schaltregler-ICs  | 199        |
| 6.4.7    | Integrierte Digitalschaltungen                                  | 199        |
| 6.5      | Schaltungstechnik   | 201        |
| 6.5.1    | Schwellwertkomparatoren   | 201        |
| 6.5.1.1  | Aufgaben und Ausführung   | 201        |
| 6.5.1.2  | Arbeitsweise von Differenzverstärkern                           | 201        |
| 6.5.1.3  | Anwendung des Differenzverstärkers als Komparator               | 203        |
| 6.5.1.4  | Operationsverstärker als Komparator                             | 204        |
| 6.5.2    | Regelungsschaltungen  | 205        |
| 6.5.2.1  | Schaltungen mit diskreten Transistoren                          | 205        |
| 6.5.2.2  | Grundprinzip der Stabilisierungsschaltungen                     | 207        |
| 6.5.2.3  | Einige Serienstabilisierungsschaltungen                         | 210        |
| 6.5.3    | Anwendung von Gatterschaltungen beim Aufbau von Multivibratoren | 218        |
| 6.5.3.1  | Monostabile Multivibratoren                                     | 218        |
| 6.5.3.2  | Bistabile Multivibratoren                                       | 221        |
| 6.5.3.3  | Astabile Multivibratoren  | 223        |
| <b>7</b> | <b>Methoden und Geräte für die Energieaufbereitung</b>          | <b>225</b> |
| 7.1      | Übersicht   | 225        |
| 7.2      | Transformatoren   | 226        |
| 7.3      | Gleichrichter   | 227        |
| 7.4      | Gleichstromwandler (Konverter)                                  | 227        |
| 7.4.1    | Drosselwandler  | 227        |
| 7.4.1.1  | Übersicht   | 227        |
| 7.4.1.2  | Drosselwandlerschaltungen                                       | 230        |
| 7.4.1.3  | Regelschaltungen für Drosselwandler                             | 232        |
| 7.4.2    | Transformatorwandler  | 235        |
| 7.4.2.1  | Allgemeines zur Gleichstromtransformation                       | 235        |
| 7.4.2.2  | Sperrwandler  | 239        |
| 7.4.2.3  | Durchflußwandler  | 243        |
| 7.5      | Wechselrichter (Inverter)                                       | 246        |
| 7.5.1    | Übersicht   | 246        |
| 7.5.2    | Rechteck-Wechselrichter   | 246        |
| 7.5.2.1  | Unregelte Geräte ohne und mit Filtern                           | 246        |
| 7.5.2.2  | Geregelte Geräte ohne und mit Filtern                           | 248        |
| 7.5.3    | Treppenspannungs-Inverter                                       | 252        |
| 7.5.3.1  | Geräte für die Versorgung aus einer einzigen Spannungsquelle    | 252        |
| 7.5.3.2  | Geräte mit Versorgung aus mehreren abgestuften Spannungsquellen | 252        |
| 7.5.4    | Pulsweiten-gesteuerte Wechselrichter                            | 255        |
| 7.5.4.1  | Geräte mit HF-Transformatoren                                   | 255        |
| 7.5.4.2  | Geräte mit NF-Transformatoren                                   | 255        |
| 7.5.4.3  | Geräte ohne Transformatoren                                     | 256        |
| 7.5.5    | Digital gesteuerte Inverter                                     | 257        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>8</b> | <b>Überwachungs- und Steuereinrichtungen</b>               | <b>259</b> |
| 8.1      | Meßwerte   | 259        |
| 8.1.1    | Ströme   | 259        |
| 8.1.2    | Spannungen   | 261        |
| 8.1.3    | Leistungen   | 263        |
| 8.1.4    | Umgesetzte Energie   | 263        |
| 8.1.5    | Sonstige Meßwerte  | 264        |
| 8.1.6    | Meßwertaufzeichnung  | 264        |
| 8.1.6.1  | Analogaufzeichnung   | 264        |
| 8.1.6.2  | Digitalaufzeichnung  | 264        |
| 8.1.7    | Fernübertragung von Meßwerten                              | 265        |
| 8.1.8    | Datenerfassung bei einer Photovoltaik-Demonstrationsanlage | 265        |
| 8.2      | Schwellwarterfassung und Verarbeitung                      | 269        |
| 8.2.1    | Analoge Verfahren  | 269        |
| 8.2.1.1  | Komparatoren   | 270        |
| 8.2.1.2  | Spannungsschwellwerte                                      | 271        |
| 8.2.1.3  | Stromschwellwerte  | 274        |
| 8.2.1.4  | Temperaturschwellwerte                                     | 274        |
| 8.3      | Entwurf von Steuerschaltungen für Stromversorgungssysteme  | 276        |
| 8.3.1    | Digitale Verfahren   | 279        |
| <b>9</b> | <b>Schaltungstechnik</b>                                   | <b>282</b> |
| 9.1      | Zielsetzungen und Konzepte                                 | 282        |
| 9.2      | Systeme mit lastabhängigem Solar-Generator-Arbeitspunkt    | 282        |
| 9.2.1    | Arbeitspunktvorgabe durch die Verbraucherkennlinie         | 282        |
| 9.2.2    | Arbeitspunktvorgabe bei batteriegepufferten Systemen       | 284        |
| 9.2.2.1  | Abgeschalteter Verbraucher                                 | 284        |
| 9.2.2.2  | Eingeschalteter Verbraucher                                | 286        |
| 9.2.3    | Kennlinienbetrieb mit Ladestrom-Begrenzungswiderstand      | 287        |
| 9.2.4    | Arbeitspunkteinstellung mit Parallelreglern                | 289        |
| 9.2.4.1  | Methode der Parallel-Begrenzung                            | 289        |
| 9.2.4.2  | Ladespannungsbegrenzung mit Parallelreglern                | 289        |
| 9.2.4.3  | Ladegrenzstrom als Führungsgröße                           | 293        |
| 9.2.5    | Arbeitspunkteinstellung mit Serienreglern                  | 295        |
| 9.2.5.1  | Methode der Serienbegrenzung                               | 295        |
| 9.2.5.2  | Ladespannungsbegrenzung mit Serienreglern                  | 297        |
| 9.2.5.3  | Ladestrombegrenzung mit Serienreglern                      | 300        |
| 9.2.6    | Schaltbegrenzer als Überwachungsschutz für die Batterie    | 301        |
| 9.2.6.1  | Der Schaltbegrenzer — Sonderfall des Zweipunktreglers      | 301        |
| 9.2.6.2  | Ladespannungsbegrenzung durch Parallel-Schaltregler        | 303        |
| 9.2.6.3  | Ladespannungsbegrenzung durch Serien-Schaltregler          | 304        |
| 9.2.6.4  | Überschussenergienutzung mit Hilfe von Schaltbegrenzern    | 306        |
| 9.3      | Systeme mit leistungsoptimalem Solargenerator-Arbeitspunkt | 309        |

## Inhalt

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 9.3.1     | Prinzip des „Maximum Power Point Tracking“ (MPPT)                           | 309        |
| 9.3.2     | Die Technik des MPPT  | 311        |
| 9.3.2.1   | Anpassungswandler   | 311        |
| 9.3.2.2   | Regelglieder  | 311        |
| 9.3.3     | Anwendbarkeit des MPPT  | 313        |
| 9.3.3.1   | Allgemeine Gesichtspunkte   | 313        |
| 9.3.3.2   | MPPT beim Laden von Batterien   | 314        |
| 9.3.3.3   | MPPT beim Versorgen von Wasserpumpen  | 315        |
| 9.3.3.4   | MPPT bei Systemen mit Netzparallelbetrieb                                   | 320        |
| 9.4       | Systeme mit weiteren Stromquellen im Parallelbetrieb mit dem Solargenerator | 321        |
| 9.4.1     | Grundformen von Parallelbetrieb-Systemen                                    | 321        |
| 9.4.2     | Systeme im Inselbetrieb   | 322        |
| 9.4.2.1   | Systeme ohne Speicher   | 322        |
| 9.4.2.2   | Systeme mit Speichern   | 322        |
| 9.4.3     | Netzgekoppelte Systeme  | 322        |
| 9.5       | Schaltungen und Geräte für Systeme mit Energieaufbereitung                  | 325        |
| 9.5.1     | Die Ausgangssituation   | 325        |
| 9.5.2     | Aufbereitung für Gleichstromverbraucher                                     | 325        |
| 9.5.2.1   | Speicherfreie Systeme   | 326        |
| 9.5.2.2   | Speichergestützte Systeme   | 326        |
| 9.5.3     | Aufbereitung für Wechselstromverbraucher                                    | 329        |
| 9.5.3.1   | Speicherfreie Systeme   | 329        |
| 9.5.3.2   | Speichergestützte Systeme   | 329        |
| <b>10</b> | <b>Normen und Vorschriften bei der Planung photovoltaischer Anlagen</b>     | <b>331</b> |
| 10.1      | Übersicht   | 331        |
| 10.2      | Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen  | 332        |
| 10.3      | Berührungsschutz  | 334        |
| 10.3.1    | Schutzmaßnahmen gegen direktes und indirektes Berühren                      | 334        |
| 10.3.2    | Schutzmaßnahmen im Niederspannungsbereich                                   | 339        |
| 10.3.2.1  | Schutz durch Schutzkleinspannung  | 339        |
| 10.3.2.2  | Begrenzung der Entladungsenergie  | 342        |
| 10.3.2.3  | Schutz durch Funktionskleinspannung   | 342        |
| 10.3.3    | Schutzmaßnahmen im Niederspannungsbereich                                   | 343        |
| 10.4      | Blitzschutz   | 343        |
| <b>11</b> | <b>Photovoltaische Anlagen im Niederspannungsbereich</b>                    | <b>345</b> |
| 11.1      | Beispiele für Anlagen im Niederspannungsbereich                             | 345        |
| 11.1.1    | Einsatzmöglichkeiten  | 345        |
| 11.1.2    | Einsetzbare Verbraucher   | 345        |
| 11.2      | Planung und Ausführung der Anlagen  | 346        |
| 11.2.1    | Das photovoltaische Rumpfsystem   | 346        |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| 11.2.1.1  | Definition und Dimensionierung  | 346 |
| 11.2.1.2  | Auswahl des Solargenerators   | 348 |
| 11.2.1.2  | Auswahl der Speicherbatterie  | 349 |
| 11.2.3    | Ausbaustufen des Rumpfsystems   | 349 |
| 11.2.3.1  | Vor- und Nachteile der Rumpfsystemausführung                                | 349 |
| 11.2.3.2  | Ausbau mit Sperrdiode und Ladespannungsbegrenzer                            | 349 |
| 11.2.3.3  | Erweiterter Ausbau durch Unterspannungsschutz                               | 350 |
| 11.2.4    | Ausgestaltung des Ausgangs der Stromversorgung                              | 350 |
| 11.2.4.1  | Gleichspannungs-Ausgang   | 350 |
| 11.2.4.2  | Wechselspannungs-Ausgang  | 351 |
| 11.2.5    | Maßnahmen gegen Überspannungen  | 352 |
| 11.2.6    | Überstromschutz   | 354 |
| 11.2.7    | Schutz der Anlage gegen Umwelteinflüsse                                     | 355 |
| 11.2.7.1  | Umweltbedingungen   | 355 |
| 11.2.7.2  | Unterbringung des Solargenerators   | 355 |
| 11.2.7.3  | Unterbringung der Systemelektronik und der Batterie                         | 356 |
| 11.2.8    | Anschluß der Verbraucher an die Stromversorgung                             | 356 |
| 11.3      | Lieferumfang bei Anlagen für entlegene Gebiete                              | 356 |
| 11.3.1    | Allgemeines   | 356 |
| 11.3.2    | Hardware  | 357 |
| 11.3.3    | Software  | 357 |
| 11.4      | Wirkungsgrad der Anlage am Einsatzort                                       | 357 |
| 11.5      | Beurteilungskriterien für photovoltaische Kleinanlagen                      | 357 |
| 11.5.1    | Allgemeines   | 357 |
| 11.5.2    | Beurteilung der eingesetzten Verbraucher                                    | 358 |
| 11.5.3    | Solargenerator  | 358 |
| 11.5.4    | Speicher bzw. Pufferbatterie  | 359 |
| 11.5.5    | Systemauslegung   | 359 |
| 11.5.6    | Ausbaustufen bei Regelungssystemen  | 360 |
| 11.5.7    | Schutzschaltungen gegen Tiefentladung der Batterie                          | 360 |
| 11.5.8    | Energieaufbereitung   | 361 |
| 11.5.8.1  | Gleichspannungsausgang  | 361 |
| 11.5.8.2  | Wechselspannungsausgang   | 361 |
| 11.5.9    | Schutzmaßnahmen gegen Überspannungen  | 362 |
| 11.5.9.1  | Schutz der Anlagenbenutzer  | 362 |
| 11.5.9.2  | Blitzschutz   | 362 |
| 11.5.10   | Schutzmaßnahmen gegen Überströme  | 363 |
| 11.5.11   | Widerstandsfähigkeit des Systems gegen die zu erwartenden Umweltbedingungen | 363 |
| 11.5.11.1 | Allgemeines   | 363 |
| 11.5.11.2 | Solargenerator  | 363 |
| 11.5.11.3 | Durch Umhüllung geschützte Komponenten                                      | 364 |
| 11.5.12   | Verbraucheranschluß   | 364 |
| 11.5.13   | Wenn ein komplettes Paket eingekauft wird                                   | 364 |
| 11.5.13.1 | Allgemeines   | 364 |



## Inhalt

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 11.5.13.2 | Kontroll-Liste für die Hardware   | 365        |
| 11.5.13.3 | Kontroll-Liste für die Software   | 365        |
| 11.5.13.4 | Unterlagen und Anweisungen für Fehlersuche und Reparatur                              | 365        |
| 11.6      | Ein ausbaufähiges System für den Schutzkleinspannungsbereich                          | 366        |
| <b>12</b> | <b>Photovoltaische Anlagen im Niederspannungsbereich</b>                              | <b>367</b> |
| 12.1      | Systemaufbau und Beispiele  | 367        |
| 12.2      | Niederspannungsanlagen im Inselbetrieb  | 368        |
| 12.3      | Niederspannungsanlagen mit Netzkopplung   | 368        |
| 12.3.1    | Die Elektrizitätsversorgungsunternehmen als Partner                                   | 368        |
| 12.3.2    | Das Bund-Länder-1000-Dächer-Programm und das Verfahren zur Beantragung von Zuschüssen | 369        |
| 12.3.3    | Das 1000-Dächer-Programm aus der Sicht des EVU  | 371        |
| 12.3.3.1  | Das Beispiel  | 371        |
| 12.3.3.2  | Elektro-Installation von netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen                         | 372        |
| 12.3.4    | Blitzschutz   | 379        |
| 12.3.4.1  | Übersicht   | 379        |
| 12.3.4.2  | Außerer Blitzschutz und Einkopplung von Überspannungen                                | 380        |
| 12.3.4.3  | Der Innere Blitzschutz  | 383        |
| 12.3.5    | Technik der Wechselrichter für Netzkopplung   | 384        |
| 12.3.5.1  | Besonderheiten bei Photovoltaik-Anlagen   | 384        |
| 12.3.5.2  | Netzsynchronisierte Wechselrichter  | 386        |
| 12.3.5.3  | Merkmale zur Beurteilung von Wechselrichtern  | 391        |
| 12.3.6    | Installation von netzgekoppelten PV-Anlagen   | 392        |
| 12.3.7    | Vorläufige Ergebnisse des Bund-Länder-1000-Dächer-Programmes                          | 392        |
|           | <b>Sachverzeichnis</b>  | <b>395</b> |