

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Übersicht	1
1.1	Photovoltaik – Was ist das?	1
1.2	Zum Aufbau dieses Buches	9
1.3	Einige für die Photovoltaik wichtige Begriffe und Definitionen	11
1.3.1	<i>Begriffe aus der Meteorologie, Astronomie und Geometrie</i>	11
1.3.2	<i>Begriffe aus der Photovoltaik</i>	12
1.4	Richtwerte für Potenzialabschätzungen bei Photovoltaikanlagen	14
1.4.1	<i>Solarzellenwirkungsgrad η_{PV}</i>	15
1.4.2	<i>Solarmodulwirkungsgrad η_M</i>	15
1.4.3	<i>Energiewirkungsgrad (Nutzungsgrad, Gesamtwirkungsgrad) η_E</i>	15
1.4.4	<i>Jahresenergieertrag pro installiertes Kilowatt Solargenerator-Spitzenleistung</i>	16
1.4.5	<i>Flächenbedarf von Photovoltaikanlagen</i>	17
1.4.6	<i>Kosten pro installiertes Kilowatt Spitzenleistung</i>	18
1.4.7	<i>Einspeisetarife und Subventionen</i>	18
1.4.8	<i>Weltweite Produktion von Solarzellen</i>	19
1.4.9	<i>In Photovoltaikanlagen installierte Spitzenleistung</i>	20
1.4.10	<i>Voraussichtliche zukünftige Entwicklung der Weltproduktion</i>	22
1.5	Beispiele zu Kapitel 1	22
1.6	Literatur zu Kapitel 1	24
2	Wichtige Eigenschaften der Sonnenstrahlung	25
2.1	Sonne und Erde	25
2.1.1	<i>Die Sonnendeklination</i>	26
2.1.2	<i>Die scheinbare Bahn der Sonne</i>	27
2.2	Die extraterrestrische Strahlung	28
2.3	Die Einstrahlung auf die horizontale Erdoberfläche	30
2.3.1	<i>In Horizontalebene eingestrahelte Energie H</i>	31
2.4	Einfache Methode für die Berechnung der Strahlung auf geneigte Flächen	38
2.4.1	<i>Jahres-Globalstrahlungsfaktoren</i>	43
2.4.2	<i>Beispiele zur elementaren Strahlungsberechnung auf geneigte Flächen</i>	47
2.5	Berechnung der Strahlung auf geneigte Flächen mit Dreikomponentenmodell	48
2.5.1	<i>Die Zusammensetzung der Globalstrahlung auf die Horizontalebene</i>	49
2.5.2	<i>Die am Boden reflektierte Strahlung</i>	49
2.5.3	<i>Die drei Komponenten der Strahlung auf geneigte Flächen</i>	50
2.5.3.1	<i>Die Direktstrahlung auf eine geneigte Fläche</i>	51
2.5.3.2	<i>Die Diffusstrahlung auf eine geneigte Fläche</i>	51
2.5.3.3	<i>Die vom Boden reflektierte Strahlung auf eine geneigte Fläche</i>	52
2.5.3.4	<i>Auf eine geneigte Fläche eingestrahelte Gesamtenergie bei tiefem Horizont</i>	52
2.5.4	<i>Näherungsweise Berücksichtigung der Beschattung durch den Horizont</i>	53
2.5.4.1	<i>Die Beschattung durch wandartige Strukturen</i>	55
2.5.5	<i>Der Einfluss der Elevation von Horizont und Fassade (resp. Dachkante) auf die Diffusstrahlung</i>	57
2.5.5.1	<i>Der Einfluss der diffusen Himmelsstrahlung</i>	59
2.5.5.2	<i>Der Einfluss der vom Boden resp. der Fassade reflektierten Strahlung</i>	59

2.5.6	<i>Auf geneigte Flächen eingestrahlte Gesamtenergie im allgemeinen Fall</i>	60
2.5.7	<i>Nachträgliche Berechnung der Einstrahlung auf den geneigten Solargenerator mit gemessenen Globalstrahlungswerten in die Horizontalebene</i>	62
2.5.8	<i>Beispiele für Strahlungsberechnung mit Dreikomponentenmethode</i>	62
2.6	Approximativer Jahresenergieertrag netzgekoppelter PV-Anlagen	66
2.6.1	<i>Beispiele zur approximativen Energieertragsberechnung</i>	67
2.7	Die Zusammensetzung der Sonnenstrahlung	67
2.8	Messung der Sonneneinstrahlung	69
2.8.1	<i>Pyranometer</i>	69
2.8.2	<i>Referenzzellen</i>	70
2.8.3	<i>Vergleich zwischen Messungen mit Referenzzellen und Pyranometern</i>	71
2.9	Literatur zu Kapitel 2	74
3	Aufbau und Funktionsprinzip von Solarzellen	75
3.1	Der innere Photoeffekt in Halbleitern	75
3.2	Kurze Halbleitertheorie	77
3.2.1	<i>Dotierung von Halbleitern</i>	78
3.2.2	<i>Der p/n-Übergang</i>	79
3.2.3	<i>Kennlinien einer Halbleiterdiode</i>	81
3.3	Die Solarzelle – eine spezielle Halbleiterdiode mit grosser lichtexponierter Sperrschicht	82
3.3.1	<i>Prinzipieller Aufbau einer kristallinen Silizium-Solarzelle</i>	82
3.3.2	<i>Ersatzschaltung einer Solarzelle</i>	83
3.3.3	<i>Kennlinien von Solarzellen</i>	85
3.4	Der Wirkungsgrad von Solarzellen	89
3.4.1	<i>Der spektrale Wirkungsgrad η_S (bei einem Übergang)</i>	89
3.4.2	<i>Der theoretische Wirkungsgrad η_T (bei einem Übergang)</i>	92
3.4.3	<i>Der praktische Wirkungsgrad η_{PV} (bei einem Übergang)</i>	96
3.4.4	<i>Methoden zur Erhöhung des Wirkungsgrades</i>	100
3.4.4.1	<i>Optische Konzentration des Sonnenlichtes</i>	100
3.4.4.2	<i>Tandem- und Tripelzellen</i>	101
3.4.4.3	<i>Noch höhere Grenzen des Wirkungsgrades?</i>	103
3.5	Die wichtigsten Solarzellenarten und ihre Herstellung	104
3.5.1	<i>Kristalline Silizium-Solarzellen</i>	104
3.5.1.1	<i>Die Kugel-Solarzelle</i>	108
3.5.2	<i>Galliumarsenid-Solarzellen</i>	109
3.5.3	<i>Dünnschicht-Solarzellen</i>	109
3.5.3.1	<i>Solarzellen aus amorphem Silizium (a-Si)</i>	110
3.5.3.2	<i>Solarzellen aus Cadmiumtellurid (CdTe)</i>	113
3.5.3.3	<i>Solarzellen aus Kupferindiumdiselenid (CuInSe₂, CIS) und (Cu(In,Ga)Se₂, CIGS)</i>	114
3.5.3.4	<i>Tandemzellen aus mikrokristallinem und amorphem Silizium</i>	115
3.5.4	<i>Farbstoff-Solarzellen (photoelektrochemische Solarzellen, Grätzel-Zellen)</i>	116
3.6	Bifacial-Solarzellen (beidseitig aktive Solarzellen)	117
3.7	Beispiele zu Kapitel 3	117
3.8	Literatur zu Kapitel 3	120

4	Solarmodule und Solargeneratoren	121
4.1	Solarmodule	121
4.2	Probleme bei der Zusammenschaltung von Solarzellen	131
4.2.1	<i>Kennlinien von Solarzellen in allen Quadranten</i>	131
4.2.1.1	Rückstromverhalten (Verhalten im Dioden-Durchlassbereich)	131
4.2.1.2	Verhalten der Solarzelle bei Spannungsumkehr (im Dioden-Sperrbereich)	133
4.2.1.3	Richtwerte für zulässige totale flächenspezifische thermische Verlustleistung	133
4.2.2	<i>Serieschaltung von Solarzellen</i>	134
4.2.2.1	Gefahr der Bildung von "Hot-Spots"	134
4.2.2.2	Bypassdioden in Modulen	137
4.2.2.3	Möglicher Verzicht auf Bypassdioden	139
4.2.3	<i>Parallelschaltung von Solarzellen</i>	140
4.3	Zusammenschaltung von Solarmodulen zu Solargeneratoren	142
4.3.1	<i>Serieschaltung von Solarmodulen zu einem Strang oder String</i>	143
4.3.1.1	Strangdioden	143
4.3.1.2	Strangsicherungen	144
4.3.1.3	Strang-Sicherungsautomaten	144
4.3.2	<i>Parallelschaltung von Solarmodulen</i>	145
4.3.3	<i>Solargenerator mit parallel geschalteten Seriesträngen</i>	145
4.3.3.1	Rückströme und Kurzschlussströme bei Solargeneratordefekten	147
4.3.3.2	Direkte Parallelschaltung von Strängen	149
4.3.4	<i>Solargenerator mit Matrixschaltung der Solarmodule</i>	150
4.4	Leistungsverluste im Solargenerator durch Teilbeschattungen + Mismatch	151
4.4.1	<i>Verluste infolge Beschattung einzelner Module</i>	151
4.4.2	<i>Mismatch- oder Fehlanpassungs-Verluste infolge Exemplarstreuungen</i>	154
4.4.3	<i>Mismatch-Verluste infolge Strahlungsinhomogenitäten</i>	157
4.5	Praktischer Aufbau von Solargeneratoren	157
4.5.1	<i>Montagearten für Solargeneratoren</i>	157
4.5.1.1	Freifeldmontage	158
4.5.1.2	Flachdachmontage	158
4.5.1.3	Schrägdachmontage mit separatem Aufbau	161
4.5.1.4	Schrägdachmontage in Dachfläche integriert	162
4.5.1.5	Fassadenmontage und Fassadenintegration	163
4.5.1.6	Montage auf geeigneten bereits vorhandenen Strukturen	165
4.5.1.7	Nachgeführte Photovoltaikanlagen	165
4.5.2	<i>Realisierung der Tragstruktur</i>	167
4.5.2.1	Mechanische Dimensionierung der Tragstruktur	167
4.5.2.2	Geeignete Materialien für die Tragstruktur	170
4.5.3	<i>Elektrische Verschaltung des Solargenerators</i>	171
4.5.3.1	Die Gefahr durch die dauernd anliegende Spannung bei Photovoltaikanlagen	171
4.5.3.2	Das Brandrisiko durch Lichtbögen bei Photovoltaikanlagen	172
4.5.3.3	Anforderungen an die Spannungsfestigkeit und Witterungsbeständigkeit der Komponenten	173
4.5.3.4	Hinweise zur Komponentenauswahl und zur Realisierung des PV-Generators	174
4.5.3.5	Der (Teil-)Generatoranschlusskasten (Arrayanschlusskasten)	177
4.5.4	<i>Verluste in der Gleichstromverkabelung</i>	181

4.5.5	<i>Erdungsprobleme auf der Gleichstromseite</i>	183
4.5.5.1	Erdung von Metallgehäusen und metallischen Tragstrukturen	183
4.5.5.2	Erdung aktiver Teile des Solargenerators	183
4.5.6	<i>Prinzipieller Aufbau grösserer Solargeneratoren</i>	185
4.5.7	<i>Schutz von Personen gegen gefährliche Berührungsspannungen</i>	186
4.5.7.1	Betrieb der Anlage mit Schutzkleinspannung (Schutzklasse III)	186
4.5.7.2	Schutz durch räumliche Distanz	187
4.5.7.3	Sonderisolation (doppelte Isolation), Schutzklasse II	187
4.5.8	<i>Beeinträchtigungen der Solargeneratorleistung im praktischen Betrieb</i>	188
4.5.8.1	Teilbeschattung durch lokale Verschmutzung	188
4.5.8.2	Schmutzablagerungen an Modulrahmen oder Lamineinfassungen	188
4.5.8.3	Generelle Leistungsreduktion durch Schmutzablagerungen	190
4.5.8.4	Schneebedeckung des Solargenerators	192
4.6	Beispiele zu Kapitel 4	193
4.7	Literatur zu Kapitel 4	196
5	Photovoltaische Energiesysteme	197
5.1	Photovoltaische Inselanlagen	198
5.1.1	<i>Akkumulatoren in Photovoltaikanlagen</i>	201
5.1.1.1	Einsatz von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren in Photovoltaikanlagen	201
5.1.1.2	Wichtige elektrische Eigenschaften von Bleiakkumulatoren	202
5.1.1.3	Für Photovoltaikanlagen geeignete Typen von Bleiakkumulatoren	212
5.1.2	<i>Aufbau photovoltaischer Inselanlagen</i>	216
5.1.2.1	Wahl der Systemspannung und der Modulspannung	216
5.1.2.2	Rückstromdiode, Tiefentladeschutz und Überladeschutz	217
5.1.2.3	Anlagen mit Serieregler	217
5.1.2.4	Anlagen mit Parallelregler oder Shuntregler	219
5.1.2.5	Anlagen mit Maximum-Power-Tracker (MPT)	220
5.1.2.6	Beispiele kommerziell erhältlicher Solarregler (Laderegler mit Tiefentladeschutz)	221
5.1.3	<i>Wechselrichter für photovoltaische Inselanlagen</i>	223
5.1.3.1	Rotierende Umformer	224
5.1.3.2	Rechteckwechselrichter	224
5.1.3.3	Pulsbreitengeregelte Rechteckwechselrichter	224
5.1.3.4	Sinuswechselrichter	225
5.1.3.5	Notwendige Akkugrösse in Funktion der Wechselrichterleistung	230
5.1.3.6	Stromverlauf auf der DC-Seite von Sinuswechselrichtern für Inselbetrieb	231
5.1.4	<i>Gleichstromverbraucher für Inselanlagen</i>	231
5.1.5	Photovoltaik-Inselanlagen mit 230 V Wechselstrom	232
5.1.6	Photovoltaik-Inselanlagen mit Wechselstrom-Energiebus	234
5.2	Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen	236
5.2.1	<i>Prinzip des Netzverbundbetriebs</i>	236
5.2.1.1	Mögliche Zählerschaltungen bei netzgekoppelten Photovoltaikanlagen	238
5.2.1.2	Mögliche Anlagenkonzepte bei netzgekoppelten Photovoltaikanlagen	238
5.2.1.3	Grundsätzliche Problematik bei netzgekoppelten Photovoltaikanlagen	240

5.2.2	<i>Aufbau und Funktionsprinzip von Photovoltaik-Netzwechselrichtern</i>	241
5.2.2.1	Anforderungen an Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen	241
5.2.2.2	Netzgeführte Wechselrichter	242
5.2.2.3	Unterschiede zwischen selbstgeführten und netzgeführten Wechselrichtern	246
5.2.2.4	Selbstgeführte pulswertenmodulierte Wechselrichter mit NF-Trafo	247
5.2.2.5	Selbstgeführter pulswertenmodulierte Wechselrichter ohne Trafo	248
5.2.2.6	Selbstgeführte pulswertenmodulierte Wechselrichter mit HF-Zwischenkreis	251
5.2.2.7	Neuere Ideen und Weiterentwicklungen bei PV-Netzverbund-Wechselrichtern	252
5.2.2.8	Bilder einiger PV-Netzverbund-Wechselrichter	253
5.2.3	<i>Auf Netzverbund-Wechselrichter anwendbare Normen und Vorschriften</i>	254
5.2.3.1	Provisorische Sicherheitsvorschrift für photovoltaische Anlagen	254
5.2.3.2	Provisorische Sicherheitsvorschrift für Wechselrichter für photovoltaische Stromerzeugungsanlagen	255
5.2.3.3	Niederfrequente Störungen in Stromversorgungsnetzen	255
5.2.3.3.1	Spannungsänderungen	255
5.2.3.3.2	Immunität gegen Rundsteuersignale	256
5.2.3.3.3	Grenzwerte für Oberschwingungsströme	257
5.2.3.4	Hochfrequente Störungen (150 kHz – 30 MHz)	259
5.2.3.4.1	Funktstörspannungen auf Netzanschlussleitungen	260
5.2.3.4.2	Übrige Leitungen (insbesondere Gleichstrom-Anschlussleitungen)	260
5.2.3.5	Weitere Normen	262
5.2.4	<i>Vermeidung von Selbstlauf resp. Inselbetrieb bei Netzwechselrichtern</i>	262
5.2.4.1	Selbstlauf bei angepasster Last	266
5.2.4.2	Prinzipielle Möglichkeiten zur Detektion eines unerwünschten Inselbetriebs	268
5.2.4.3	Dreiphasige Über- und Unterspannungsüberwachung	269
5.2.4.4	Frequenzschiebeverfahren	270
5.2.4.5	Permanente Überwachung der Netzimpedanz durch ENS	271
5.2.4.6	Neue selbsttätige Schaltstelle zwischen Eigenerzeugungsanlage und Netz	275
5.2.5	<i>Betriebsverhalten und Eigenschaften von Photovoltaik-Netzwechselrichtern</i>	276
5.2.5.1	Umwandlungs-Wirkungsgrad	280
5.2.5.2	Maximalleistungs-(MPP-)Regelverhalten und MPP-Tracking-Wirkungsgrad	283
5.2.5.3	Totaler Wirkungsgrad oder Gesamtwirkungsgrad eines Wechselrichters	286
5.2.5.4	Dynamische MPP-Tracking-Tests	288
5.2.5.5	Oberschwingungsströme	289
5.2.5.6	Emission hochfrequenter Störspannungen	291
5.2.5.7	Entwicklung der Wechselrichterzuverlässigkeit	293
5.2.5.7.1	Systematische Untersuchung der Rundsteuersignal-Empfindlichkeit	294
5.2.5.7.2	Entwicklung der Wechselrichterzuverlässigkeit im Laufe der Zeit	295
5.2.5.8	Leistungsbegrenzung bei überdimensioniertem Solargenerator	297
5.2.5.9	Geräuschentwicklung im Betrieb	300
5.2.5.10	Ausschaltvorgänge bei Netzunterbruch unter Last	301
5.2.6	<i>Auftretende Probleme und mögliche Gegenmassnahmen beim Netzverbundbetrieb von Photovoltaikanlagen</i>	302
5.2.6.1	Bestimmung der Netzimpedanz Z_N am Verknüpfungspunkt	303
5.2.6.1.1	Mittlere sekundärseitige Impedanzwerte von Mittelspannungstransformatoren	304
5.2.6.1.2	Approximative Werte für Reaktanzbeläge von Leitungen	304
5.2.6.1.3	Widerstand und Reaktanz der Leitung	305
5.2.6.1.4	Gesamte 50Hz-Netzimpedanz Z_N	305

5.2.6.1.5	Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt	306
5.2.6.2	Spannungsanhebung am Anschluss- und Verknüpfungspunkt	306
5.2.6.2.1	Die Speiseleitungsverluste	310
5.2.6.3	Oberschwingungen	311
5.2.6.3.1	Störende Auswirkungen von Oberschwingungsströmen	311
5.2.6.3.2	Beurteilung auf Grund gemessener Oberschwingungsströme	312
5.2.6.3.3	Grobbeurteilung bei netzgeführten Wechselrichtern	312
5.2.6.3.4	Reduktion der störende Auswirkungen von Oberschwingungsströmen	313
5.2.6.4	Elektromagnetische Verträglichkeit	314
5.2.6.5	Wechselrichterdefekte	314
5.2.6.6	Tipps für den Praktiker für die Dimensionierung des Netzanschlusses	315
5.2.6.7	Berechnungsbeispiele für den Netzanschluss	315
5.2.6.8	Optimale DC-Betriebsspannung bei Netzverbundanlagen	318
5.2.6.8.1	Definition der verwendeten Grössen	319
5.2.6.8.2	Verhalten des PV-Generators bei verschiedenen Einstrahlungen und Temperaturen	320
5.2.6.8.3	Definition der relevanten Spannungsfaktoren (mit Angabe typischer Werte)	321
5.2.6.8.4	DC-seitige spannungsmässige Dimensionierung von PV-Anlagen	321
5.2.6.8.5	Beispiele zur DC-seitigen spannungsmässigen Dimensionierung von PV-Anlagen	323
5.2.6.9	Mögliche DC-seitige Probleme beim Einsatz neuartiger Zelltechnologien	323
5.2.6.10	Rückblick auf die gewonnenen Erkenntnisse und Ausblick	323
5.2.7	<i>Regelungs- und Stabilitätsprobleme im Verbundnetz</i>	324
5.2.7.1	Prinzip der Leistungsregelung im Verbundnetz	324
5.2.7.2	Belastung des Stromnetzes im Tagesverlauf	326
5.2.7.3	Dauerlinien, Energieausnutzung, Volllaststunden und Auslastung	327
5.2.7.4	Maximal ins Netz einspeisbare Energie	330
5.2.7.4.1	Situation bei Verwendung fest montierter Anlagen am Beispiel der Schweiz	330
5.2.7.4.2	Mögliche Verbesserung durch weitere technische und tarifliche Massnahmen	331
5.2.7.4.3	Situation im europäischen Verbundnetz	332
5.2.7.5	Möglichkeiten zur Substitution von Bandenergie	333
5.2.7.5.1	Stromspeicherung in Pumpspeicherwerken	334
5.2.7.5.2	Wasserstoffwirtschaft	336
5.2.7.5.3	Globales elektrisches Verbundnetz	336
5.2.7.6	Wirtschaftliche Konsequenzen auf den Betrieb anderer Kraftwerke	336
5.2.7.7	Zusammenfassung und Ausblick	337
5.3	Literatur zu Kapitel 5	338
6	Blitzschutz von Photovoltaikanlagen	343
6.1	Wahrscheinlichkeit von direkten Blitzeinschlägen	343
6.1.1	<i>Beispiele zur Berechnung der jährlichen Anzahl Direkteinschläge</i>	345
6.2	Kennwerte und prinzipielle Auswirkungen von Erdblitzten	345
6.2.1	<i>Arten von Blitzen</i>	346
6.2.2	<i>Auswirkungen von Blitzen</i>	347
6.2.3	<i>Schutzklassen und Wirksamkeit von Blitzschutzanlagen</i>	347
6.2.4	<i>Verwendung von Näherungslösungen für die Blitzschutz-Dimensionierung</i>	347
6.3	Grundprinzipien des Blitzschutzes	348
6.3.1	<i>Ausserer und innerer Blitzschutz</i>	348
6.3.2	<i>Bestimmung des Schutzbereichs mit dem Blitzkugelverfahren</i>	348

6.3.3	<i>Schutzbereich von Fangstäben und Fangleitungen</i>	350
6.3.4	<i>Massnahmen zum Blitzschutz elektrischer Anlagen</i>	350
6.4	Aufteilung von Blitzströmen auf die einzelnen Ableitungen	351
6.5	Potenzialanhebung und Potenzialausgleich	352
6.5.1	<i>Realisierung des Potenzialausgleichs</i>	353
6.5.2	<i>Teilblitzströme auf den in den Potenzialausgleich einbezogenen Leitungen</i>	354
6.5.3	<i>Ableiter</i>	355
6.6	Durch Blitzströme induzierte Spannungen und Ströme	356
6.6.1	<i>Gegeninduktivitäten und induzierte Spannungen bei Rechteckschleifen</i>	358
6.6.1.1	<i>Rechteckschleifen mit Teilstrecken von Ableitungen</i>	358
6.6.1.2	<i>Von Ableitungen getrennte Rechteckschleifen</i>	359
6.6.2	<i>Näherungen zwischen Ableitungen und anderen Installationen</i>	362
6.6.3	<i>Induzierte Ströme</i>	364
6.6.3.1	<i>In verlustloser Schleife induzierter Kurzschlussstrom</i>	365
6.6.3.2	<i>Induzierte Ströme in Schleifen mit Überspannungsableitern</i>	365
6.6.3.3	<i>Induzierte Ströme in Bypassdioden</i>	373
6.6.4	<i>Spannungen im Innern von blitzstromführenden Zylindern</i>	379
6.7	Experimente zum Blitzschutz von Photovoltaikanlagen	381
6.7.1	<i>Einführung</i>	381
6.7.2	<i>Der Stossstromgenerator</i>	381
6.7.2.1	<i>Für PV-Anlagen wichtige Blitzkennwerte</i>	381
6.7.2.2	<i>Aufbau und Kenndaten der verwendeten Stossstromanlage</i>	382
6.7.3	<i>Testplatz für Solarmodulkennlinien</i>	383
6.7.4	<i>Beschädigungen durch im Rahmen oder in unmittelbarer Nähe von einzelnen Solarzellen und Solarmodulen fließende Ströme</i>	384
6.7.4.1	<i>Ergebnisse der Zellen- und Modultests</i>	385
6.7.5	<i>Erhöhung der Immunität von Modulen gegenüber Blitzströmen</i>	387
6.7.6	<i>Miniatur-Blitzfänger für Photovoltaikanlagen</i>	388
6.7.7	<i>Messungen der in einzelnen Modulen induzierten Spannungen</i>	389
6.7.7.1	<i>Einführung</i>	389
6.7.7.2	<i>Induzierte Spannungen bei einem additiven Modul in Parallel-Position</i>	390
6.7.7.3	<i>Induzierte Spannungen bei einem additiven Modul in Normal-Position</i>	392
6.7.7.4	<i>Rahmen-Reduktionsfaktor bei verschiedenen Modultypen</i>	393
6.7.7.5	<i>Einfluss von Aluminiumfolie auf der Modulrückseite</i>	394
6.7.7.6	<i>Praktische Messungen der Blitzstromempfindlichkeit von Bypassdioden</i>	395
6.7.7.7	<i>Einfluss von gerahmten Nachbarmodulen auf die induzierten Spannungen</i>	397
6.7.8	<i>Induzierte Spannungen bei verdrahteten Solargeneratoren</i>	397
6.7.8.1	<i>Überlagerungssatz für induzierte Maximalspannungen</i>	397
6.7.8.2	<i>Reduktion der induzierten Verdrahtungsspannung bei gerahmten Modulen</i>	398
6.7.8.3	<i>Einfluss der Erdung von Solargeneratoren</i>	400
6.7.8.3.1	<i>Geerdeter Solargenerator ohne Teilblitzstrom in DC-Hauptleitung</i>	401
6.7.8.3.2	<i>Geerdeter Solargenerator mit Teilblitzstrom in abgeschirmter DC-Hauptleitung</i>	403
6.7.8.3.3	<i>Geerdeter Solargenerator mit Teilblitzstrom in DC-Hauptleitung mit parallelem Erdleiter</i>	405
6.7.9	<i>Zusammenfassung über die durchgeführten Experimente</i>	406
6.8	Blitzschutztechnisch optimale Dimensionierung des PV-Generators	407
6.8.1	<i>Gegeninduktivität von Solarmodulen</i>	408
6.8.2	<i>Gegeninduktivität der Verdrahtung</i>	409
6.8.3	<i>Berechnungsbeispiel für auftretendes M_S und u_{max} in einem ganzen Strang</i>	410

6.8.4	<i>Auswirkungen von Ferneinschlägen</i>	411
6.8.4.1	Bei Ferneinschlägen kapazitiv eingekoppelte Verschiebungsströme	411
6.8.4.2	Dimensionierung der Überspannungsableiter auf die Verschiebungsströme	412
6.8.4.3	Abschätzung der von Verschiebungsströmen verursachten Spannungen	413
6.8.4.4	Beispiele zur Abschätzung der Einflüsse eingekoppelter Verschiebungsströme	417
6.9	Praktische Realisierung des Blitzschutzes bei PV-Anlagen	419
6.9.1	<i>Prinzipiell mögliche Schutzmassnahmen</i>	419
6.9.2	<i>Schutz nur gegen Ferneinschläge</i>	421
6.9.3	<i>Schutz gegen Ferneinschläge und Naheinschläge (bis ca. 20 m)</i>	422
6.9.4	<i>Schutz vor Direkteinschlägen bei PV-Anlagen auf Gebäuden</i>	423
6.9.4.1	Direkteinschlag bei PV-Anlage mit Solargenerator im Schutzbereich von Fangeinrichtungen ohne Teilblitzstrom in DC-Hauptleitung	423
6.9.4.2	Direkteinschlag bei PV-Anlage mit Solargenerator im Schutzbereich von Fangeinrichtungen mit Teilblitzstrom in DC-Hauptleitung	424
6.9.5	<i>Blitzschutz von grossen Photovoltaikanlagen auf freiem Feld</i>	426
6.9.6	<i>Blitzschutz von Photovoltaikanlagen auf Flachdächern</i>	428
6.9.7	<i>Blitzschutz von PV-Anlagen nach bestehenden Vorschriften in der Schweiz</i>	430
6.10	Zusammenfassung und Ausblick	431
6.11	Literatur zu Kapitel 6	432
7	Normierte Darstellung von Energieertrag und Leistung bei Photovoltaikanlagen	433
7.1	Einführung	433
7.2	Normierte Erträge, Verluste und Performance Ratio	433
7.2.1	<i>Die normierten Erträge (Yields)</i>	433
7.2.2	<i>Definition der normierten Verluste (Losses)</i>	435
7.2.3	<i>Die Performance Ratio</i>	435
7.2.4	<i>Übersichtstabelle mit den neuen normierten Grössen</i>	436
7.3	Standardgrafiken für normierte Erträge und Verluste	436
7.3.1	<i>Normierte Jahres- und Monatsstatistiken</i>	436
7.3.2	<i>Normierte Tagesstatistik mit Stundenwerten</i>	439
7.4	Normierte Leistungen bei Photovoltaikanlagen	441
7.4.1	<i>Normiertes Tagesdiagramm mit Momentanwerten</i>	442
7.4.2	<i>Berechnung der Tages-Energieerträge aus normierten Momentanwerten</i>	443
7.4.3	<i>Definition der Korrekturfaktoren k_G, k_T und des Nutzungsgrades n_I</i>	443
7.4.4	<i>Auswertungsmöglichkeiten mit normierten Tagesdiagrammen</i>	443
7.4.5	<i>Beispiele zu den normierten Tagesdiagrammen</i>	444
7.5	Fehlereingrenzung mit den verschiedenen Darstellungsarten	447
7.6	Zusammenfassung und Ausblick	450
7.7	Literatur zu Kapitel 7	450
8	Dimensionierung von Photovoltaikanlagen	451
8.1	Prinzip und Ausgangsgrössen für die Ertragsberechnung	451
8.1.1	<i>Strahlungsberechnung</i>	452
8.1.2	<i>Bestimmung des Temperatur-Korrekturfaktors k_T</i>	452
8.1.2.1	<i>Näherungsweise Bestimmung der strahlungsgewichteten Zelltemperatur</i>	453

8.1.2.2	Berechnung von k_T und Y_T	455
8.1.2.3	Verwendung der k_T -Werte der Referenzstationen	456
8.1.3	<i>Wahl des Generator-Korrekturfaktors k_G</i>	457
8.1.3.1	Einflüsse auf den Generator-Korrekturfaktor k_G	457
8.1.3.1.1	Korrekturfaktor k_{PM} für Minderleistung der Module	457
8.1.3.1.2	Korrekturfaktor k_{NG} für niedrige Einstrahlung	457
8.1.3.1.3	Korrekturfaktor k_{GR} für Glasreflexionsverluste	458
8.1.3.1.4	Korrekturfaktor k_{SP} für spektralen Mismatch	458
8.1.3.1.5	Korrekturfaktor k_{TB} für Teilbeschattung einzelner Module	458
8.1.3.1.6	Korrekturfaktor k_{MM} für Mismatch	458
8.1.3.1.7	Korrekturfaktor k_R für ohmsche Verluste	459
8.1.3.1.8	Korrekturfaktor k_V für Verluste infolge Modulverschmutzungen	459
8.1.3.1.9	Korrekturfaktor k_S für Verluste infolge Schneebedeckung	459
8.1.3.1.10	Korrekturfaktor k_{MPP} für Verluste infolge MPP-Tracking-Fehlern	459
8.1.3.1.11	Diskussion der in der Praxis besonders ins Gewicht fallenden Faktoren	460
8.1.3.2	Richtwerte für den Generator-Korrekturfaktor k_G	460
8.2	Ertragsberechnung bei netzgekoppelten PV-Anlagen	464
8.2.1	<i>Beispiele zur Ertragsberechnung bei netzgekoppelten PV-Anlagen</i>	466
8.2.1.1	Beispiele mit vereinfachter Strahlungsberechnung nach Kap. 2.4	466
8.2.1.2	Beispiele mit Strahlungsberechnung mit Dreikomponentenmodell nach Kap. 2.5	469
8.3	Dimensionierung von PV-Inselanlagen mit Akku	472
8.3.1	<i>Berechnung des mittleren täglichen Energieverbrauchs der Verbraucher</i>	472
8.3.2	<i>Notwendige Akkukapazität K</i>	474
8.3.3	<i>Dimensionierung des Solargenerators</i>	474
8.3.3.1	PV-Generator-Dimensionierung bei normalen Ladereglern	475
8.3.3.2	PV-Generator-Dimensionierung bei Ladereglern mit MPT	476
8.3.3.3	Richtwerte für einige Grössen bei PV-Inselanlagen	477
8.3.4	<i>Tabellen für Dimensionierung von PV-Inselanlagen</i>	478
8.3.5	<i>Beispiele zur Dimensionierung von Inselanlagen</i>	481
8.3.5.1	Beispiele mit vereinfachter Strahlungsberechnung nach Kap. 2.4	481
8.3.5.2	Beispiel mit Strahlungsberechnung mit Dreikomponentenmodell nach Kap. 2.5	488
8.4	Programme auf dem Internet zur Strahlungsberechnung	490
8.4.1	<i>PVGIS des EU-Forschungszentrums JRC in Ispra/Italien</i>	490
8.4.2	<i>Europäische Strahlungsdatenbank Satel-Light</i>	490
8.5	Simulationsprogramme	491
8.6	Literatur zu Kapitel 8	491
9	Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen	493
9.1	Die Kosten photovoltaisch erzeugten Stromes	493
9.1.1	<i>Beispiele mit genauerer Energiepreisberechnung</i>	495
9.1.2	<i>Vergleich der Kosten von PV-Strom mit denen von konventionellem Strom</i>	497
9.1.3	<i>Kosten von durch Pumpspeicherkraftwerke veredeltem PV-Strom</i>	499
9.2	Graue Energie, Energierücklaufzeit und Erntefaktor	500
9.3	Literatur zu Kapitel 9	504
10	Betriebserfahrungen	505
10.1	Beispiele von einigen realisierten PV-Anlagen mit gemessenen Ertragsdaten	505

10.1.1	<i>PV-Anlage Gfeller, Burgdorf</i>	505
10.1.2	<i>PV-Anlage Mont Soleil im Berner Jura (1270 m)</i>	509
10.1.3	<i>PV-Anlage Jungfrauojoch (3454 m)</i>	513
10.1.4	<i>PV-Anlage Birg (2670 m)</i>	519
10.1.5	<i>PV-Anlage Stade de Suisse in Bern</i>	523
10.1.6	<i>PV-Anlage Newtech mit Dünnschichtzellen-Modulen</i>	525
10.1.7	<i>PV-Anlage Neue Messe München</i>	532
10.1.8	<i>PV-Anlage Leipziger Land</i>	534
10.1.9	<i>PV-Anlage Springerville (USA)</i>	537
10.2	Vergleich zwischen einigen PV-Anlagen in der Schweiz	538
10.3	Literatur zu Kapitel 10	541
11	Zusammenfassung und Ausblick	543
A	Anhang mit Berechnungstabellen und Strahlungsdaten	549
A1	Kopiervorlagen der Tabellen zur Strahlungsberechnung nach Kap. 2	549
<i>A1.1</i>	<i>Einfache Strahlungsberechnung nach Kap. 2.4</i>	549
<i>A1.2</i>	<i>Strahlungsberechnung mit Dreikomponentenmodell nach Kap. 2.5</i>	549
A2	Monatssummen der horizontalen Globalstrahlung	
	Tabelle mit Monatsmittelwerten der Einstrahlung H in die Horizontalebene (global+diffus) für 173 verschiedene Orte auf der ganzen Welt	550
A3	Globalstrahlungsfaktoren für einige Referenzstandorte	
	Globalstrahlungsfaktoren für Strahlungsumrechnung in geneigte Ebene für neun Referenz-Standorte (für vereinfachte Strahlungsberechnung nach Kap. 2.4)	557
A4	R_B-Faktoren für Strahlungsberechnungen mit der Dreikomponentenmethode	
	(für Standorte zwischen 24°N und 60°N)	560
A5	Beschattungsdiagramme für verschiedene geografische Breiten (41°N...53°N)	572
A6	Kopiervorlagen für Tabellen zur PV-Ertragsberechnung	575
<i>A6.1</i>	<i>Tabellen zur Ertragsberechnung bei netzgekoppelten PV-Anlagen (Kap. 8.2)</i>	575
<i>A6.2</i>	<i>Tabellen zur Dimensionierung von PV-Inselanlagen (Kap. 8.3)</i>	577
A7	Zusatzkarten zur Strahlungs- und Ertragsberechnung	580
<i>A7.1</i>	<i>Beispiel eines Sonnenstandsdiagramms in Polardarstellung (für Burgdorf)</i>	580
<i>A7.2</i>	<i>Strahlungskarten (für die ganze Welt, die Alpenländer und Deutschland)</i>	580
<i>A7.3</i>	<i>Karte für möglichen PV-Jahresenergieertrag in Europa</i>	584
B	Anhang B:	
	Links, Bücher, Stichwörter, Symbole, Abkürzungen usw.	585
B1	Einige Internet-Links zu Photovoltaik-Webseiten	585
B2	Bücher zur Photovoltaik und verwandten Gebieten	587
B3	Stichwortverzeichnis	590
B4	Liste der wichtigsten verwendeten Symbole (mit Einheiten)	597
B5	Liste der wichtigsten verwendeten Abkürzungen	604
B6	Vorsilben für dekadische Bruchteile und Vielfache von Einheiten	605
B7	Einige nützliche Umrechnungsfaktoren	605
B8	Wichtige Naturkonstanten	605
	Verdankungen	606