

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Übersicht</b>	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	<b>Richtwerte für Potenzialabschätzungen bei Photovoltaikanlagen</b>	14
1.4.1	<i>Solarzellenwirkungsgrad <math>\eta_{PV}</math></i>	15
1.4.2	<i>Solarmodulwirkungsgrad <math>\eta_M</math></i>	15
1.4.3	<i>Energiewirkungsgrad (Nutzungsgrad, Anlagenwirkungsgrad) <math>\eta_E</math></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>	20
1.4.9	<i>In Photovoltaikanlagen installierte Spitzenleistung</i>	21
1.4.10	<i>Voraussichtliche zukünftige Entwicklung der Weltproduktion</i>	23
1.5	<b>Beispiele zu Kapitel 1</b>	24
1.6	<b>Literatur zu Kapitel 1</b>	26
<b>2</b>	<b>Wichtige Eigenschaften der Sonnenstrahlung</b>	27
2.1	<b>Sonne und Erde</b>	27
2.1.1	<i>Die Sonnendeklination</i>	28
2.1.2	<i>Die scheinbare Bahn der Sonne</i>	29
2.2	<b>Die extraterrestrische Strahlung</b>	31
2.3	<b>Die Einstrahlung auf die horizontale Erdoberfläche</b>	33
2.3.1	<i>In Horizontalebene eingestrahelte Energie <math>H</math></i>	34
2.4	<b>Einfache Methode für die Berechnung der Strahlung auf geneigte Flächen</b>	41
2.4.1	<i>Jahres-Globalstrahlungsfaktoren</i>	46
2.4.2	<i>Beispiele zur elementaren Strahlungsberechnung auf geneigte Flächen</i>	50
2.5	<b>Berechnung der Strahlung auf geneigte Flächen mit Dreikomponentenmodell</b>	51
2.5.1	<i>Die Zusammensetzung der Globalstrahlung auf die Horizontalebene</i>	52
2.5.2	<i>Die am Boden reflektierte Strahlung</i>	52
2.5.3	<i>Die drei Komponenten der Strahlung auf geneigte Flächen</i>	53
2.5.3.1	<i>Die Direktstrahlung auf eine geneigte Fläche</i>	54
2.5.3.2	<i>Die Diffusstrahlung auf eine geneigte Fläche</i>	54
2.5.3.3	<i>Die vom Boden reflektierte Strahlung auf eine geneigte Fläche</i>	55
2.5.3.4	<i>Auf eine geneigte Fläche eingestrahelte Gesamtenergie bei tiefem Horizont</i>	55
2.5.4	<i>Näherungsweise Berücksichtigung der Beschattung durch den Horizont</i>	56
2.5.4.1	<i>Die Beschattung durch wandartige Strukturen</i>	58
2.5.5	<i>Der Einfluss der Elevation von Horizont und Fassade (resp. Dachkante) auf die Diffusstrahlung</i>	60
2.5.5.1	<i>Der Einfluss der diffusen Himmelsstrahlung</i>	62
2.5.5.2	<i>Der Einfluss der vom Boden resp. der Fassade reflektierten Strahlung</i>	62

2.5.6	<i>Auf geneigte Flächen eingestrahlte Gesamtenergie im allgemeinen Fall</i>	63
2.5.7	<i>Nachträgliche Berechnung der Einstrahlung auf den geneigten Solargenerator mit gemessenen Globalstrahlungswerten in die Horizontalebene</i>	65
2.5.8	<i>Beispiele für Strahlungsberechnung mit Dreikomponentenmethode</i>	65
2.6	<b>Approximativer Jahresenergieertrag netzgekoppelter PV-Anlagen</b>	70
2.6.1	<i>Beispiele zur approximativen Energieertragsberechnung</i>	71
2.7	<b>Die Zusammensetzung der Sonnenstrahlung</b>	71
2.8	<b>Messung der Sonneneinstrahlung</b>	73
2.8.1	<i>Pyranometer</i>	73
2.8.2	<i>Referenzzellen</i>	74
2.8.3	<i>Vergleich zwischen Messungen mit Referenzzellen und Pyranometern</i>	75
2.9	<b>Literatur zu Kapitel 2</b>	78
3	<b>Aufbau und Funktionsprinzip von Solarzellen</b>	79
3.1	<b>Der innere Photoeffekt in Halbleitern</b>	79
3.2	<b>Kurze Halbleitertheorie</b>	81
3.2.1	<i>Dotierung von Halbleitern</i>	82
3.2.2	<i>Der p/n-Übergang</i>	83
3.2.3	<i>Kennlinien einer Halbleiterdiode</i>	85
3.3	<b>Die Solarzelle – eine spezielle Halbleiterdiode mit grosser lichtexponierter Sperrschicht</b>	86
3.3.1	<i>Prinzipieller Aufbau einer kristallinen Silizium-Solarzelle</i>	86
3.3.2	<i>Ersatzschaltung einer Solarzelle</i>	87
3.3.3	<i>Kennlinien von Solarzellen</i>	89
3.4	<b>Der Wirkungsgrad von Solarzellen</b>	93
3.4.1	<i>Der spektrale Wirkungsgrad <math>\eta_S</math> (bei einem Übergang)</i>	93
3.4.2	<i>Der theoretische Wirkungsgrad <math>\eta_T</math> (bei einem Übergang)</i>	96
3.4.3	<i>Der praktische Wirkungsgrad <math>\eta_{PV}</math> (bei einem Übergang)</i>	100
3.4.4	<i>Methoden zur Erhöhung des Wirkungsgrades</i>	104
3.4.4.1	<i>Optische Konzentration des Sonnenlichtes</i>	104
3.4.4.2	<i>Tandem- und Tripelzellen</i>	105
3.4.4.3	<i>Noch höhere Grenzen des Wirkungsgrades?</i>	107
3.5	<b>Die wichtigsten Solarzellenarten und ihre Herstellung</b>	108
3.5.1	<i>Kristalline Silizium-Solarzellen</i>	108
3.5.1.1	<i>Die Kugel-Solarzelle</i>	112
3.5.2	<i>Galliumarsenid-Solarzellen</i>	113
3.5.3	<i>Dünnschicht-Solarzellen</i>	113
3.5.3.1	<i>Solarzellen aus amorphem Silizium (a-Si)</i>	114
3.5.3.2	<i>Solarzellen aus Cadmiumtellurid (CdTe)</i>	117
3.5.3.3	<i>Solarzellen aus Kupferindiumdiselenid (CuInSe<sub>2</sub>, CIS) und (Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, CIGS)</i>	118
3.5.3.4	<i>Tandemzellen aus mikrokristallinem und amorphem Silizium</i>	119
3.5.4	<i>Farbstoff-Solarzellen (photoelektrochemische Solarzellen, Grätzel-Zellen)</i>	120
3.6	<b>Bifacial-Solarzellen (beidseitig aktive Solarzellen)</b>	121
3.7	<b>Beispiele zu Kapitel 3</b>	121
3.8	<b>Literatur zu Kapitel 3</b>	124

<b>4</b>	<b>Solarmodule und Solargeneratoren</b>	125
<b>4.1</b>	<b>Solarmodule</b>	125
<b>4.2</b>	<b>Probleme bei der Zusammenschaltung von Solarzellen</b>	135
4.2.1	<i>Kennlinien von Solarzellen in allen Quadranten</i>	135
4.2.1.1	Rückstromverhalten (Verhalten im Dioden-Durchlassbereich)	135
4.2.1.2	Verhalten der Solarzelle bei Spannungsumkehr (im Dioden-Sperrbereich)	137
4.2.1.3	Richtwerte für zulässige totale flächenspezifische thermische Verlustleistung	137
4.2.2	<i>Serieschaltung von Solarzellen</i>	138
4.2.2.1	Gefahr der Bildung von "Hot-Spots"	138
4.2.2.2	Bypassdioden in Modulen	141
4.2.2.3	Möglicher Verzicht auf Bypassdioden	143
4.2.3	<i>Parallelschaltung von Solarzellen</i>	144
<b>4.3</b>	<b>Zusammenschaltung von Solarmodulen zu Solargeneratoren</b>	147
4.3.1	<i>Serieschaltung von Solarmodulen zu einem Strang oder String</i>	147
4.3.1.1	Strangdioden	148
4.3.1.2	Strangsicherungen	149
4.3.1.3	Strang-Sicherungsautomaten	150
4.3.2	<i>Parallelschaltung von Solarmodulen</i>	150
4.3.3	<i>Solargenerator mit parallel geschalteten Seriesträngen</i>	151
4.3.3.1	Rückströme und Kurzschlussströme bei Solargeneratordefekten	153
4.3.3.2	Direkte Parallelschaltung von Strängen	155
4.3.3.3	Ströme in irrtümlich falsch gepolten Parallelsträngen	156
4.3.4	<i>Solargenerator mit Matrixschaltung der Solarmodule</i>	156
<b>4.4</b>	<b>Leistungsverluste im Solargenerator durch Teilbeschattungen + Mismatch</b>	157
4.4.1	<i>Verluste infolge Beschattung einzelner Module</i>	158
4.4.2	<i>Mismatch- oder Fehlanpassungs-Verluste infolge Exemplarstreuungen</i>	160
4.4.3	<i>Mismatch-Verluste infolge Strahlungsinhomogenitäten</i>	163
<b>4.5</b>	<b>Praktischer Aufbau von Solargeneratoren</b>	163
4.5.1	<i>Montagearten für Solargeneratoren</i>	164
4.5.1.1	Freifeldmontage	164
4.5.1.2	Flachdachmontage	165
4.5.1.3	Schrägdachmontage mit separatem Aufbau	167
4.5.1.4	Schrägdachmontage in Dachfläche integriert	168
4.5.1.5	Fassadenmontage und Fassadenintegration	170
4.5.1.6	Montage auf geeigneten bereits vorhandenen Strukturen	171
4.5.1.7	Nachgeführte Photovoltaikanlagen	172
4.5.2	<i>Realisierung der Tragstruktur</i>	174
4.5.2.1	Mechanische Dimensionierung der Tragstruktur	174
4.5.2.2	Geeignete Materialien für die Tragstruktur	179
4.5.3	<i>Elektrische Verschaltung des Solargenerators</i>	180
4.5.3.1	Die Gefahr durch die dauernd anliegende Spannung bei Photovoltaikanlagen	181
4.5.3.2	Das Brandrisiko durch Lichtbögen bei Photovoltaikanlagen	181
4.5.3.3	Anforderungen an die Spannungsfestigkeit und Witterungsbeständigkeit der Komponenten	183
4.5.3.4	Hinweise zur Komponentenauswahl und zur Realisierung des PV-Generators	184
4.5.3.5	Der (Teil-)Generatoranschlusskasten (Arrayanschlusskasten)	188
4.5.4	<i>Verluste in der Gleichstromverkabelung</i>	192

4.5.5	<i>Erdungsprobleme auf der Gleichstromseite</i>	194
4.5.5.1	Erdung von Metallgehäusen und metallischen Tragstrukturen	194
4.5.5.2	Erdung aktiver Teile des Solargenerators	194
4.5.6	<i>Prinzipieller Aufbau grösserer Solargeneratoren</i>	196
4.5.7	<i>Schutz von Personen gegen gefährliche Berührungsspannungen</i>	197
4.5.7.1	Betrieb der Anlage mit Schutzkleinspannung (Schutzklasse III)	197
4.5.7.2	Schutz durch räumliche Distanz	198
4.5.7.3	Sonderisolation (doppelte Isolation), Schutzklasse II	198
4.5.8	<i>Beeinträchtigungen der Solargeneratorleistung im praktischen Betrieb</i>	199
4.5.8.1	Teilbeschattung durch lokale Verschmutzung einzelner Solarzellen	199
4.5.8.2	Schmutzablagerungen an Modulrahmen oder Lamineinfassungen	200
4.5.8.3	Generelle Leistungsreduktion durch Schmutzablagerungen	203
4.5.8.4	Verschattung durch wachsende Bäume	204
4.5.8.5	Sicherheitsrelevante Langzeitschäden an Solarmodulen und Solargeneratoren	205
4.5.8.6	Leistungsreduktionen durch Degradationen an Solarmodulen	209
4.5.8.7	Hagelschäden an Solarmodulen	212
4.5.8.8	Schneebedeckung des Solargenerators	213
4.6	<b>Beispiele zu Kapitel 4</b>	214
4.7	<b>Literatur zu Kapitel 4</b>	218
<b>5</b>	<b>Photovoltaische Energiesysteme</b>	219
<b>5.1</b>	<b>Photovoltaische Inselanlagen</b>	220
5.1.1	<i>Akkumulatoren in Photovoltaikanlagen</i>	223
5.1.1.1	Einsatz von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren in Photovoltaikanlagen	223
5.1.1.2	Wichtige elektrische Eigenschaften von Bleiakkumulatoren	224
5.1.1.3	Für Photovoltaikanlagen geeignete Typen von Bleiakkumulatoren	234
5.1.2	<i>Aufbau photovoltaischer Inselanlagen</i>	238
5.1.2.1	Wahl der Systemspannung und der Modulspannung	238
5.1.2.2	Rückstromdiode, Tiefentladeschutz und Überladeschutz	239
5.1.2.3	Anlagen mit Serieregler	239
5.1.2.4	Anlagen mit Parallelregler oder Shuntregler	241
5.1.2.5	Anlagen mit Maximum-Power-Tracker (MPT)	242
5.1.2.6	Beispiele kommerziell erhältlicher Solarregler (Laderegler mit Tiefentladeschutz)	243
5.1.3	<i>Wechselrichter für photovoltaische Inselanlagen</i>	245
5.1.3.1	Rotierende Umformer	246
5.1.3.2	Rechteckwechselrichter	246
5.1.3.3	Pulsbreitengeregelte Rechteckwechselrichter	246
5.1.3.4	Sinuswechselrichter	247
5.1.3.5	Notwendige Akkugrösse in Funktion der Wechselrichterleistung	252
5.1.3.6	Stromverlauf auf der DC-Seite von Sinuswechselrichtern für Inselbetrieb	253
5.1.4	<i>Gleichstromverbraucher für Inselanlagen</i>	253
5.1.5	<i>Photovoltaik-Inselanlagen mit 230 V Wechselstrom</i>	254
5.1.6	<i>Photovoltaik-Inselanlagen mit Wechselstrom-Energiebus</i>	256

<b>5.2</b>	<b>Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen</b>	258
5.2.1	<i>Prinzip des Netzverbundbetriebs</i>	258
5.2.1.1	Mögliche Zählerschaltungen bei netzgekoppelten Photovoltaikanlagen	260
5.2.1.2	Mögliche Anlagenkonzepte bei netzgekoppelten Photovoltaikanlagen	260
5.2.1.3	Grundsätzliche Problematik bei netzgekoppelten Photovoltaikanlagen	262
5.2.2	<i>Aufbau und Funktionsprinzip von Photovoltaik-Netzwechselrichtern</i>	263
5.2.2.1	Anforderungen an Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen	263
5.2.2.2	Netzgeführte Wechselrichter	264
5.2.2.3	Unterschiede zwischen selbstgeführten und netzgeführten Wechselrichtern	268
5.2.2.4	Selbstgeführte pulswertenmodulierte Wechselrichter mit NF-Trafo	269
5.2.2.5	Selbstgeführte pulswertenmodulierte Wechselrichter ohne Trafo	270
5.2.2.6	Selbstgeführte pulswertenmodulierte Wechselrichter mit HF-Zwischenkreis	273
5.2.2.7	Neuere Ideen und Weiterentwicklungen bei PV-Netzverbund-Wechselrichtern	274
5.2.2.8	Zentralwechselrichterstationen mit Direkteinspeisung ins Mittelspannungsnetz	275
5.2.2.9	Bilder einiger PV-Netzverbund-Wechselrichter	276
5.2.3	<i>Auf Netzverbund-Wechselrichter anwendbare Normen und Vorschriften</i>	277
5.2.3.1	Provisorische Sicherheitsvorschrift für photovoltaische Anlagen	277
5.2.3.2	Provisorische Sicherheitsvorschrift für Wechselrichter für photovoltaische Stromerzeugungsanlagen	278
5.2.3.3	Niederfrequente Störungen in Stromversorgungsnetzen	278
5.2.3.3.1	Spannungsänderungen	278
5.2.3.3.2	Immunität gegen Rundsteuersignale	279
5.2.3.3.3	Grenzwerte für Oberschwingungsströme	280
5.2.3.4	Hochfrequente Störungen (150 kHz – 30 MHz)	282
5.2.3.4.1	Funkstörspannungen auf Netzanschlussleitungen	283
5.2.3.4.2	Übrige Leitungen (insbesondere Gleichstrom-Anschlussleitungen)	283
5.2.3.5	Weitere Normen	285
5.2.4	<i>Vermeidung von Selbstlauf resp. Inselbetrieb bei Netzwechselrichtern</i>	285
5.2.4.1	Selbstlauf bei angepasster Last	288
5.2.4.2	Prinzipielle Möglichkeiten zur Detektion eines unerwünschten Inselbetriebs	290
5.2.4.3	Dreiphasige Über- und Unterspannungsüberwachung	291
5.2.4.4	Frequenzschiebverfahren	292
5.2.4.5	Permanente Überwachung der Netzimpedanz durch ENS	293
5.2.4.6	Neue selbsttätige Schaltstelle zwischen Eigenerzeugungsanlage und Netz	297
5.2.4.7	Wahrscheinlichkeit eines Inselbetriebs bei PV-Wechselrichtern	298
5.2.5	<i>Betriebsverhalten und Eigenschaften von Photovoltaik-Netzwechselrichtern</i>	301
5.2.5.1	Umwandlungs-Wirkungsgrad	306
5.2.5.2	Maximalleistungs-(MPP-)Regelverhalten und MPP-Tracking-Wirkungsgrad	310
5.2.5.3	Totaler Wirkungsgrad oder Gesamtwirkungsgrad eines Wechselrichters	314
5.2.5.4	Dynamische MPP-Tracking-Tests	318
5.2.5.4.1	Einfache dynamische MPP-Tracking Tests mit quasi-rechteckigen Mustern	319
5.2.5.4.2	Dynamische MPP-Tracking Tests mit Rampen nach prEN50530	321
5.2.5.5	Oberschwingungsströme	327
5.2.5.6	Emission hochfrequenter Störspannungen	329
5.2.5.7	Entwicklung der Wechselrichterzuverlässigkeit	331
5.2.5.7.1	Systematische Untersuchung der Rundsteuersignal-Empfindlichkeit	332
5.2.5.7.2	Entwicklung der Wechselrichterzuverlässigkeit im Laufe der Zeit	333

5.2.5.8	Leistungsbegrenzung bei überdimensioniertem Solargenerator	335
5.2.5.9	Geräuschentwicklung im Betrieb	338
5.2.5.10	Ausschaltvorgänge bei Netzunterbruch unter Last	339
5.2.6	<i>Auftretende Probleme und mögliche Gegenmassnahmen beim Netzverbundbetrieb von Photovoltaikanlagen</i>	340
5.2.6.1	Bestimmung der Netzimpedanz $Z_N$ am Verknüpfungspunkt	341
5.2.6.1.1	Mittlere sekundärseitige Impedanzwerte von Mittelspannungstransformatoren	342
5.2.6.1.2	Approximative Werte für Reaktanzbeläge von Leitungen	342
5.2.6.1.3	Widerstand und Reaktanz der Leitung	343
5.2.6.1.4	Gesamte 50Hz-Netzimpedanz $Z_N$	343
5.2.6.1.5	Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt	344
5.2.6.2	Spannungsanhebung am Anschluss- und Verknüpfungspunkt	344
5.2.6.2.1	Die Speiseleitungsverluste	349
5.2.6.3	Oberschwingungen	350
5.2.6.3.1	Störende Auswirkungen von Oberschwingungsströmen	350
5.2.6.3.2	Beurteilung auf Grund gemessener Oberschwingungsströme	350
5.2.6.3.3	Grobbeurteilung bei netzgeführten Wechselrichtern	350
5.2.6.3.4	Reduktion der störenden Auswirkungen von Oberschwingungsströmen	351
5.2.6.4	Elektromagnetische Verträglichkeit	352
5.2.6.5	Wechselrichterdefekte	352
5.2.6.6	Tipps für den Praktiker für die Dimensionierung des Netzanschlusses	353
5.2.6.7	Berechnungsbeispiele für den Netzanschluss	353
5.2.6.8	Optimale DC-Betriebsspannung bei Netzverbundanlagen	356
5.2.6.8.1	Definition der verwendeten Grössen	357
5.2.6.8.2	Verhalten des PV-Generators bei verschiedenen Einstrahlungen und Temperaturen	358
5.2.6.8.3	Definition der relevanten Spannungsfaktoren (mit Angabe typischer Werte)	359
5.2.6.8.4	DC-seitige spannungsmässige Dimensionierung von PV-Anlagen	359
5.2.6.8.5	Beispiele zur DC-seitigen spannungsmässigen Dimensionierung von PV-Anlagen	361
5.2.6.9	Mögliche DC-seitige Probleme beim Einsatz neuartiger Zelltechnologien	361
5.2.6.10	Rückblick auf die gewonnenen Erkenntnisse und Ausblick	362
5.2.7	<i>Regelungs- und Stabilitätsprobleme im Verbundnetz</i>	363
5.2.7.1	Prinzip der Leistungsregelung im Verbundnetz	363
5.2.7.2	Belastung des Stromnetzes im Tagesverlauf	366
5.2.7.3	Dauerlinien, Energieausnutzung, Vollaststunden und Auslastung	367
5.2.7.4	Maximal ins Netz einspeisbare Energie	370
5.2.7.4.1	Situation bei Verwendung fest montierter Anlagen am Beispiel der Schweiz	370
5.2.7.4.2	Mögliche Verbesserung durch weitere technische und tarifliche Massnahmen	376
5.2.7.4.3	Situation im europäischen Verbundnetz	377
5.2.7.5	<i>Möglichkeiten zur Substitution von Bandenergie</i>	377
5.2.7.5.1	Stromspeicherung in Pumpspeicherwerken	379
5.2.7.5.2	Kurzzeitspeicherung auf der Basis von Akkumulatoren	381
5.2.7.5.3	Kurzzeitspeicherung mit Akkumulatoren von Elektrofahrzeugen	382
5.2.7.5.4	Weitere mögliche Systeme zur Energiespeicherung	383
5.2.7.5.5	Wasserstoffwirtschaft	384
5.2.7.5.6	Globales elektrisches Verbundnetz	384
5.2.7.6	Wirtschaftliche Konsequenzen auf den Betrieb anderer Kraftwerke	386
5.2.7.7	Zusammenfassung und Ausblick	387
5.3	<b>Literatur zu Kapitel 5</b>	388

<b>6</b>	<b>Blitzschutz von Photovoltaikanlagen</b>	393
<b>6.1</b>	<b>Wahrscheinlichkeit von direkten Blitzeinschlägen</b>	393
6.1.1	<i>Beispiele zur Berechnung der jährlichen Anzahl Direkteinschläge <math>N_D</math></i>	395
<b>6.2</b>	<b>Kennwerte und prinzipielle Auswirkungen von Erdblitzen</b>	395
6.2.1	<i>Arten von Blitzen</i>	396
6.2.2	<i>Auswirkungen von Blitzen</i>	397
6.2.3	<i>Schutzklassen und Wirksamkeit von Blitzschutzanlagen</i>	397
6.2.4	<i>Verwendung von Näherungslösungen für die Blitzschutz-Dimensionierung</i>	397
<b>6.3</b>	<b>Grundprinzipien des Blitzschutzes</b>	398
6.3.1	<i>Äusserer und innerer Blitzschutz</i>	398
6.3.2	<i>Bestimmung des Schutzbereichs mit dem Blitzkugelverfahren</i>	398
6.3.3	<i>Schutzbereich von Fangstäben und Fangleitungen</i>	400
6.3.4	<i>Massnahmen zum Blitzschutz elektrischer Anlagen</i>	400
<b>6.4</b>	<b>Aufteilung von Blitzströmen auf die einzelnen Ableitungen</b>	401
<b>6.5</b>	<b>Potenzialanhebung und Potenzialausgleich</b>	402
6.5.1	<i>Realisierung des Potenzialausgleichs</i>	403
6.5.2	<i>Teilblitzströme auf den in den Potenzialausgleich einbezogenen Leitungen</i>	404
6.5.3	<i>Ableiter</i>	405
<b>6.6</b>	<b>Durch Blitzströme induzierte Spannungen und Ströme</b>	406
6.6.1	<i>Gegeninduktivitäten und induzierte Spannungen bei Rechteckschleifen</i>	408
6.6.1.1	<i>Rechteckschleifen mit Teilstrecken von Ableitungen</i>	408
6.6.1.2	<i>Von Ableitungen getrennte Rechteckschleifen</i>	409
6.6.2	<i>Näherungen zwischen Ableitungen und anderen Installationen</i>	412
6.6.3	<i>Induzierte Ströme</i>	414
6.6.3.1	<i>In verlustloser Schleife induzierter Kurzschlussstrom</i>	415
6.6.3.2	<i>Induzierte Ströme in Schleifen mit Überspannungsableitern</i>	415
6.6.3.3	<i>Induzierte Ströme in Bypassdioden</i>	423
6.6.4	<i>Spannungen im Innern von blitzstromführenden Zylindern</i>	429
<b>6.7</b>	<b>Experimente zum Blitzschutz von Photovoltaikanlagen</b>	431
6.7.1	<i>Einführung</i>	431
6.7.2	<i>Der Stossstromgenerator</i>	431
6.7.2.1	<i>Für PV-Anlagen wichtige Blitzkennwerte</i>	431
6.7.2.2	<i>Aufbau und Kenndaten der verwendeten Stossstromanlage</i>	432
6.7.3	<i>Testplatz für Solarmodulkennlinien</i>	433
6.7.4	<i>Beschädigungen durch im Rahmen oder in unmittelbarer Nähe von einzelnen Solarzellen und Solarmodulen fliessende Ströme</i>	434
6.7.4.1	<i>Ergebnisse der Zellen- und Modultests</i>	435
6.7.5	<i>Erhöhung der Immunität von Modulen gegenüber Blitzströmen</i>	437
6.7.6	<i>Miniatur-Blitzfänger für Photovoltaikanlagen</i>	438
6.7.7	<i>Messungen der in einzelnen Modulen induzierten Spannungen</i>	439
6.7.7.1	<i>Einführung</i>	439
6.7.7.2	<i>Induzierte Spannungen bei einem additiven Modul in Parallel-Position</i>	440
6.7.7.3	<i>Induzierte Spannungen bei einem additiven Modul in Normal-Position</i>	442
6.7.7.4	<i>Rahmen-Reduktionsfaktor bei verschiedenen Modultypen</i>	443
6.7.7.5	<i>Einfluss von Aluminiumfolie auf der Modulrückseite</i>	444
6.7.7.6	<i>Praktische Messungen der Blitzstromempfindlichkeit von Bypassdioden</i>	445
6.7.7.7	<i>Einfluss von gerahmten Nachbarmodulen auf die induzierten Spannungen</i>	447

6.7.8	<i>Induzierte Spannungen bei verdrahteten Solargeneratoren</i>	447
6.7.8.1	Überlagerungssatz für induzierte Maximalspannungen	447
6.7.8.2	Reduktion der induzierten Verdrahtungsspannung bei gerahmten Modulen	448
6.7.8.3	Einfluss der Erdung von Solargeneratoren	450
6.7.8.3.1	Geerdeter Solargenerator ohne Teilblitzstrom in DC-Hauptleitung	451
6.7.8.3.2	Geerdeter Solargenerator mit Teilblitzstrom in abgeschirmter DC-Hauptleitung	453
6.7.8.3.3	Geerdeter Solargenerator mit Teilblitzstrom in DC-Hauptleitung mit parallelem Erdleiter	455
6.7.9	<i>Zusammenfassung über die durchgeführten Experimente</i>	456
<b>6.8</b>	<b>Blitzschutztechnisch optimale Dimensionierung des PV-Generators</b>	457
6.8.1	<i>Gegeninduktivität von Solarmodulen</i>	458
6.8.2	<i>Gegeninduktivität der Verdrahtung</i>	459
6.8.3	<i>Berechnungsbeispiel für auftretendes <math>M_S</math> und <math>u_{max}</math> in einem ganzen Strang</i>	460
6.8.4	<i>Auswirkungen von Ferneinschlägen</i>	461
6.8.4.1	Bei Ferneinschlägen kapazitiv eingekoppelte Verschiebungsströme	461
6.8.4.2	Dimensionierung der Überspannungsableiter auf die Verschiebungsströme	462
6.8.4.3	Abschätzung der von Verschiebungsströmen verursachten Spannungen	463
6.8.4.4	Beispiele zur Abschätzung der Einflüsse eingekoppelter Verschiebungsströme	467
<b>6.9</b>	<b>Praktische Realisierung des Blitzschutzes bei PV-Anlagen</b>	469
6.9.1	<i>Prinzipiell mögliche Schutzmassnahmen</i>	469
6.9.2	<i>Schutz nur gegen Ferneinschläge</i>	473
6.9.3	<i>Schutz gegen Ferneinschläge und Naheinschläge (bis ca. 20 m)</i>	474
6.9.4	<i>Schutz vor Direkteinschlägen bei PV-Anlagen auf Gebäuden</i>	475
6.9.4.1	Direkteinschlag bei PV-Anlage mit Solargenerator im Schutzbereich von Fangeinrichtungen ohne Teilblitzstrom in DC-Hauptleitung	475
6.9.4.2	Direkteinschlag bei PV-Anlage mit Solargenerator im Schutzbereich von Fangeinrichtungen mit Teilblitzstrom in DC-Hauptleitung	476
6.9.5	<i>Blitzschutz von grossen Photovoltaikanlagen auf freiem Feld</i>	478
6.9.6	<i>Blitzschutz von Photovoltaikanlagen auf Flachdächern</i>	480
6.9.7	<i>Blitzschutz von PV-Anlagen nach bestehenden Vorschriften in der Schweiz</i>	482
<b>6.10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	483
<b>6.11</b>	<b>Literatur zu Kapitel 6</b>	484
<b>7</b>	<b>Normierte Darstellung von Energieertrag und Leistung bei Photovoltaikanlagen</b>	485
<b>7.1</b>	<b>Einführung</b>	485
<b>7.2</b>	<b>Normierte Erträge, Verluste und Performance Ratio</b>	485
7.2.1	<i>Die normierten Erträge (Yields)</i>	485
7.2.2	<i>Definition der normierten Verluste (Losses)</i>	487
7.2.3	<i>Die Performance Ratio</i>	487
7.2.4	<i>Übersichtstabelle mit den neuen normierten Grössen</i>	488
<b>7.3</b>	<b>Standardgrafiken für normierte Erträge und Verluste</b>	488
7.3.1	<i>Normierte Jahres- und Monatsstatistiken</i>	488
7.3.2	<i>Normierte Tagesstatistik mit Stundenwerten</i>	491
<b>7.4</b>	<b>Normierte Leistungen bei Photovoltaikanlagen</b>	493
7.4.1	<i>Normiertes Tagesdiagramm mit Momentanwerten</i>	494
7.4.2	<i>Berechnung der Tages-Energieerträge aus normierten Momentanwerten</i>	495
7.4.3	<i>Definition der Korrekturfaktoren <math>k_G</math>, <math>k_T</math> und des Nutzungsgrades <math>n_I</math></i>	495

7.4.4	<i>Auswertungsmöglichkeiten mit normierten Tagesdiagrammen</i>	495
7.4.5	<i>Beispiele zu den normierten Tagesdiagrammen</i>	496
7.5	<b>Fehlereingrenzung mit den verschiedenen Darstellungsarten</b>	499
7.6	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	502
7.7	<b>Literatur zu Kapitel 7</b>	502
<b>8</b>	<b>Dimensionierung von Photovoltaikanlagen</b>	503
<b>8.1</b>	<b>Prinzip und Ausgangsgrößen für die Ertragsberechnung</b>	503
8.1.1	<i>Strahlungsberechnung</i>	504
8.1.2	<i>Bestimmung des Temperatur-Korrekturfaktors <math>k_T</math></i>	504
8.1.2.1	Näherungsweise Bestimmung der strahlungsgewichteten Zelltemperatur	505
8.1.2.2	Berechnung von $k_T$ und $Y_T$	507
8.1.2.3	Verwendung der $k_T$ -Werte der Referenzstationen	508
8.1.3	<i>Wahl des Generator-Korrekturfaktors <math>k_G</math></i>	509
8.1.3.1	Einflüsse auf den Generator-Korrekturfaktor $k_G$	509
8.1.3.1.1	Korrekturfaktor $k_{PM}$ für Minderleistung der Module	509
8.1.3.1.2	Korrekturfaktor $k_{NG}$ für niedrige Einstrahlung	509
8.1.3.1.3	Korrekturfaktor $k_{GR}$ für Glasreflexionsverluste	510
8.1.3.1.4	Korrekturfaktor $k_{SP}$ für spektralen Mismatch	510
8.1.3.1.5	Korrekturfaktor $k_{TB}$ für Teilbeschattung einzelner Module	510
8.1.3.1.6	Korrekturfaktor $k_{MM}$ für Mismatch	510
8.1.3.1.7	Korrekturfaktor $k_R$ für ohmsche Verluste	511
8.1.3.1.8	Korrekturfaktor $k_V$ für Verluste infolge Modulverschmutzungen	511
8.1.3.1.9	Korrekturfaktor $k_S$ für Verluste infolge Schneebedeckung	511
8.1.3.1.10	Korrekturfaktor $k_{MPP}$ für Verluste infolge MPP-Tracking-Fehlern	515
8.1.3.1.11	Diskussion der in der Praxis besonders ins Gewicht fallenden Faktoren	515
8.1.3.2	Richtwerte für den Generator-Korrekturfaktor $k_G$	516
<b>8.2</b>	<b>Ertragsberechnung bei netzgekoppelten PV-Anlagen</b>	520
8.2.1	<i>Beispiele zur Ertragsberechnung bei netzgekoppelten PV-Anlagen</i>	522
8.2.1.1	Beispiele mit vereinfachter Strahlungsberechnung nach Kap. 2.4	522
8.2.1.2	Beispiele mit Strahlungsberechnung mit Dreikomponentenmodell nach Kap. 2.5	526
<b>8.3</b>	<b>Dimensionierung von PV-Inselanlagen mit Akku</b>	530
8.3.1	<i>Berechnung des mittleren täglichen Energieverbrauchs der Verbraucher</i>	530
8.3.2	<i>Notwendige Akkukapazität <math>K</math></i>	532
8.3.3	<i>Dimensionierung des Solargenerators</i>	532
8.3.3.1	PV-Generator-Dimensionierung bei normalen Laderegeln	533
8.3.3.2	PV-Generator-Dimensionierung bei Laderegeln mit MPT	534
8.3.3.3	Richtwerte für einige Größen bei PV-Inselanlagen	535
8.3.4	<i>Tabellen für Dimensionierung von PV-Inselanlagen</i>	536
8.3.5	<i>Beispiele zur Dimensionierung von Inselanlagen</i>	539
8.3.5.1	Beispiele mit vereinfachter Strahlungsberechnung nach Kap. 2.4	539
8.3.5.2	Beispiel mit Strahlungsberechnung mit Dreikomponentenmodell nach Kap. 2.5	546
<b>8.4</b>	<b>Programme auf dem Internet zur Strahlungsberechnung</b>	548
8.4.1	<i>PVGIS des EU-Forschungszentrums JRC in Ispra/Italien</i>	548
8.4.2	<i>Europäische Strahlungsdatenbank Satel-Light</i>	548
<b>8.5</b>	<b>Simulationsprogramme</b>	549
<b>8.6</b>	<b>Literatur zu Kapitel 8</b>	550

<b>9</b>	<b>Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen</b>	551
<b>9.1</b>	<b>Die Kosten photovoltaisch erzeugten Stromes</b>	551
9.1.1	<i>Beispiele mit genauerer Energiepreisberechnung</i>	553
9.1.2	<i>Vergleich der Kosten von PV-Strom mit denen von konventionellem Strom</i>	555
9.1.3	<i>Kosten von durch Pumpspeicherkraftwerke veredeltem PV-Strom</i>	560
9.1.4	<i>Kosten von durch Batteriespeicherung veredeltem PV-Strom</i>	560
<b>9.2</b>	<b>Graue Energie, Energierücklaufzeit und Erntefaktor</b>	561
<b>9.3</b>	<b>Literatur zu Kapitel 9</b>	566
<b>10</b>	<b>Betriebserfahrungen</b>	567
<b>10.1</b>	<b>Beispiele von einigen realisierten PV-Anlagen mit gemessenen Ertragsdaten</b>	567
10.1.1	<i>PV-Anlage Gfeller, Burgdorf</i>	567
10.1.2	<i>PV-Anlage Mont Soleil im Berner Jura (1270 m)</i>	571
10.1.3	<i>PV-Anlage Jungfrauoch (3454 m)</i>	575
10.1.4	<i>PV-Anlage Birg (2670 m)</i>	581
10.1.5	<i>PV-Anlage Stade de Suisse in Bern</i>	585
10.1.6	<i>PV-Anlage Newtech mit Dünnschichtzellen-Modulen</i>	588
10.1.7	<i>PV-Anlage Neue Messe München</i>	596
10.1.8	<i>PV-Anlage Leipziger Land</i>	598
10.1.9	<i>Zweiachsig nachgeführte PV-Anlage Borna</i>	602
10.1.10	<i>Zweiachsig nachgeführte PV-Anlage Erlasee</i>	603
10.1.11	<i>Zweiachsig nachgeführte PV-Anlage Guadix in Südspanien</i>	604
10.1.12	<i>Zweiachsig nachgeführte PV-Anlage der ENEA nahe bei Neapel</i>	605
10.1.13	<i>PV-Anlage Mudgee in Australien</i>	606
10.1.14	<i>PV-Anlage Springerville (USA)</i>	608
<b>10.2</b>	<b>Langzeitvergleich zwischen einigen PV-Anlagen in der Schweiz</b>	609
<b>10.3</b>	<b>Langzeitverlauf des Energieertrags der Anlagen in Burgdorf</b>	612
<b>10.4</b>	<b>Mittlere Produktionswerte von PV-Anlagen in Deutschland</b>	615
<b>10.5</b>	<b>Literatur zu Kapitel 10</b>	616
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	617

<b>A</b>	<b>Anhang mit Berechnungstabellen und Strahlungsdaten</b>	627
<b>A1</b>	<b>Kopiervorlagen der Tabellen zur Strahlungsberechnung nach Kap. 2</b>	627
<i>A1.1</i>	<i>Einfache Strahlungsberechnung nach Kap. 2.4</i>	627
<i>A1.2</i>	<i>Strahlungsberechnung mit Dreikomponentenmodell nach Kap. 2.5</i>	627
<b>A2</b>	<b>Monatssummen der horizontalen Globalstrahlung</b>	
	Tabelle mit Monatsmittelwerten der Einstrahlung H in die Horizontalebene (global+diffus) für 253 verschiedene Orte auf der ganzen Welt	628
<b>A3</b>	<b>Globalstrahlungsfaktoren für einige Referenzstandorte</b>	
	Globalstrahlungsfaktoren für Strahlungsumrechnung in geneigte Ebene für neun Referenz-Standorte (für vereinfachte Strahlungsberechnung nach Kap. 2.4)	638
<b>A4</b>	<b>R<sub>B</sub>-Faktoren für Strahlungsberechnungen mit der Dreikomponentenmethode</b>	
	(für Standorte zwischen 60°N und 40°S)	641
<b>A5</b>	<b>Beschattungsdiagramme für verschiedene geografische Breiten (41°N...53°N)</b>	667
<b>A6</b>	<b>Kopiervorlagen für Tabellen zur PV-Ertragsberechnung</b>	670
<i>A6.1</i>	<i>Tabellen zur Ertragsberechnung bei netzgekoppelten PV-Anlagen (Kap. 8.2)</i>	670
<i>A6.2</i>	<i>Tabellen zur Dimensionierung von PV-Insulanlagen (Kap. 8.3)</i>	672
<b>A7</b>	<b>Tabellen mit k<sub>T</sub>- und k<sub>G</sub>-Werten für Ertragsberechnungen</b>	675
<i>A7.1</i>	<i>Tabelle mit k<sub>T</sub>-Werten für einige Referenzstationen</i>	675
<i>A7.2</i>	<i>Tabelle mit k<sub>G</sub>-Werten für einige Referenzstationen</i>	676
<b>A8</b>	<b>Zusatzkarten zur Strahlungs- und Ertragsberechnung</b>	678
<i>A8.1</i>	<i>Beispiel eines Sonnenstandsdiagramms in Polardarstellung (für Burgdorf)</i>	678
<i>A8.2</i>	<i>Strahlungskarten (für die ganze Welt, die Alpenländer, Deutschland, Afrika, Asien, Ozeanien, Nordamerika und Südamerika)</i>	678
<i>A8.3</i>	<i>Karten für möglichen PV-Jahresenergieertrag in Europa und Umgebung</i>	687
<b>B</b>	<b>Anhang B:</b>	
	<b>Links, Bücher, Stichwörter, Symbole, Abkürzungen usw.</b>	689
<b>B1</b>	<b>Einige Internet-Links zu Photovoltaik-Webseiten</b>	689
<b>B2</b>	<b>Bücher zur Photovoltaik und verwandten Gebieten</b>	691
<b>B3</b>	<b>Stichwortverzeichnis</b>	694
<b>B4</b>	<b>Liste der wichtigsten verwendeten Symbole (mit Einheiten)</b>	701
<b>B5</b>	<b>Liste der wichtigsten verwendeten Abkürzungen</b>	708
<b>B6</b>	<b>Vorsilben für dekadische Bruchteile und Vielfache von Einheiten</b>	709
<b>B7</b>	<b>Einige nützliche Umrechnungsfaktoren</b>	709
<b>B8</b>	<b>Wichtige Naturkonstanten</b>	709
	<b>Verdankungen</b>	710