

Inhaltsverzeichnis

1 Komponenten und Varianten von Photovoltaikanlagen	14
1.1 Komponenten netzgekoppelter Photovoltaikdachanlagen	14
1.2 Netzkopplung mit Eigenversorgung und Batteriespeicher.....	15
1.2.1 Netzkopplung mit Eigenversorgung	15
1.2.2 Netzkopplung mit Eigenversorgung und Batteriespeicher	15
1.2.3 Vorteile von Photovoltaikanlagen mit Batteriespeichern	16
1.2.4 Eigenversorgung und Autarkie.....	17
1.2.5 Batteriespeicheranbindung	18
1.2.6 Batteriesteuерungen.....	18
1.2.7 Batterietypen.....	18
1.2.8 Wirtschaftlichkeit netzgekoppelte PV-Anlage ohne Batterie	19
1.2.9 Wirtschaftlichkeit netzgekoppelte PV-Anlage mit Batterie.....	20
1.2.10 Wirtschaftlichkeit eines Batteriespeichers	21
1.3 Messstellen-Zählerkonfigurationen	22
1.3.1 PV-Anlage mit Wärmepumpe und Batteriespeicher.....	22
1.3.2 2 PV-Anlagen mit Batteriespeicher	23
1.3.3 Zwei PV-Anlagen mit Wärmepumpe und Batteriespeicher	24
1.4 Heizen mit Wärmepumpen und PV-Anlagen.....	25
1.4.1 Prinzip	25
1.4.2 Energiefluss	25
2 Photoeffekt – Funktionsweise von Solarzellen.....	26
2.1 Entdeckung	26
2.2 Umwandlung von Wärmestrahlung in elektrische Energie.....	26
2.3 Entstehung von Spannung und freien Ladungsträgern	27
3 Modul- und Zelltechnologien	30
3.1 Technologieüberblick.....	30
3.2 Kristalline Siliziummodule auf Waferbasis	31
3.3 Dünnschichtzellen und -module	32
3.3.1 Funktionsweise	32
3.3.2 Aufbau	34
3.3.3 Herstellungsverfahren	34
3.4 Verschaltungsvarianten bei Dünnschicht- und Waferzellen.....	35
3.4.1 Elektrische Werte von Modulspannung und Strom	35
3.4.2 Monolithisch verschaltetes Dünnschichtmodul.....	35
3.4.3 Leitfähig gefüllte Löcher als Verschaltung	36
3.4.4 Dünnschichtzellen verschaltet wie kristalline Zellen.....	37
3.5 Markteingeführte Dünnschichttechnologien	38

3.5.1	Cl[G]S – Kupfer (Cu), Indium (In), [Gallium (Ga)] und Selen (Se)	38
3.5.2	CdTe (Cadmium[Cd]-Tellurid[Te])	38
3.5.3	Amorphes Silizium, mikrokristallines Silizium	39
3.6	Hybridzellen, Tandemzellen.....	39
3.7	Organische Photovoltaik	39
3.8	Vergleich: Dickschichtmodule – Dünnschichtmodule.....	39
4	Elektrisches Verhalten von Solarzellen	42
4.1	Elektrische Größen und Parameter.....	42
4.1.1	Modulnennleistung, Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung	42
4.1.2	Temperaturkoeffizienten für Leerlaufspannung – Kurzschlussstrom	43
4.1.3	Füllfaktor.....	44
4.1.4	Nominal Operating Cell Temperature	44
4.1.5	Moduleistung, Modulstrom und Spannung als abhängige Größe	45
4.1.6	Beispiel: Angaben eines Moduldatenblatts	46
4.1.7	Kennlinienfeld einer Zelle	48
4.1.8	Solarzellen-Ersatzschaltbild.....	50
4.2	Elektrische Betriebszustände eines Moduls/einer Solarzelle	52
4.2.1	Aktiver und passiver Betriebszustand.....	52
4.2.2	Funktion der Bypassdiode	54
4.2.3	Falsch gepoltes Modul.....	55
4.3	Verschaltung von Solarzellen zu Photovoltaikgeneratoren	56
4.3.1	Modulspannung und Strom.....	57
4.3.2	Serienschaltung von Solarzellen im Ersatzschaltbild.....	57
4.4	Verschaltung der Module zu einem Generator	59
4.4.1	Serienschaltung	59
4.4.2	Parallelverschaltung	60
4.4.3	Vergleich: Serienverschaltung und Parallelverschaltung	60
4.4.4	Auswirkung von Modultoleranzen auf die Generatorleistung	61
4.4.5	Auswirkung von Modultoleranzen auf die Generatorleistung	63
4.4.6	Verschattungen – Serienverschaltung mit Bypassdiode – Kennlinien ..	65
4.4.7	Serienschaltung mit Bypassdiode im Ersatzschaltbild	67
4.5	Messprotokolle aus der Praxis	69
4.5.1	Unverschattetes Modul PMPP = 160 +/- 3 %	69
4.5.2	Umrechnung auf STC-Werte	70
4.5.3	Diagonale Modulverschattung, Zellenverschattung	71
4.5.4	Generator unverschattet	73
4.5.5	Generator mit mittlerer Verschattung	76
4.5.6	Generator mit stärkerer Verschattung – mehrere MPP-Punkte	78
4.5.7	Messung einer Generatorpeakleistung unter realen Bedingungen	80
5	Wechselrichter.....	84
5.1	Aufgaben und Varianten	84

5.1.1	Aufgaben des Wechselrichters	84
5.1.2	Wechselrichtervarianten	86
5.2	Wechselrichterkenngrößen für die Anlagenauslegung	88
5.3	Wirkungsgrade.....	90
5.3.1	Statischer Anpassungswirkungsgrad (static MPPT efficiency).....	92
5.3.2	Messung des statischen Anpassungswirkungsgrades.....	93
5.3.3	Beispiele statischer Anpassungswirkungsgrad	95
5.3.4	Gewichteter statischer Anpassungswirkungsgrad.....	97
5.3.5	Dynamischer Anpassungswirkungsgrad – Einschaltverhalten	99
5.3.6	Statischer Umwandlungswirkungsgrad	101
5.3.7	Messung des statischen Umwandlungswirkungsgrades	102
5.3.8	Beispiele statischer Umwandlungswirkungsgrad	104
5.3.9	Gewichteter statischer Umwandlungswirkungsgrad.....	106
5.3.10	Beispiele gewichteter statischer Umwandlungswirkungsgrad	107
5.3.11	Totaler Wirkungsgrad – Gesamtwirkungsgrad	107
5.3.12	Berechnung des statischen Gesamtwirkungsgrades	108
5.3.13	Europäischer Umwandlungswirkungsgrad	111
5.3.14	Fazit und Zusammenfassung	112
5.3.15	Typische Werte für Wirkungsgrade handelsüblicher Wechselrichter .	112
5.4	Angaben auf dem Datenblatt eines Wechselrichters.....	113
5.5	Wechselrichter im Vergleich	115
6	Anlagenauslegung – Anlagenplanung	118
6.1	Elektrische Kenn- und Ausgangsgrößen	118
6.1.1	Ausgangsgrößen von Generator und Strings.....	118
6.1.2	Ausgangsgrößen des Moduls	118
6.1.3	Ausgangsgrößen des Wechselrichters	118
6.2	Anpassung: Wechselrichter – Photovoltaikgenerator.....	119
6.2.1	Generator und Wechselrichterleistung	119
6.2.2	Stringspannungen und Wechselrichter	120
6.3	Rechenbeispiel	121
6.3.1	Modul Schott Poly TM 170	121
6.3.2	Wechselrichter Sunways NT 6000	121
6.3.3	Ausgangsgrößen des Generators	121
6.3.4	Berechnung.....	121
6.4	Zusammenfassung	122
6.4.1	Grafische Darstellung des Beispiels	122
6.4.2	Anmerkungen zur Anlagenauslegung	122
7	Baurecht, Konstruktion (Statik und Montage)	124
7.1	Baugenehmigung	124
7.2	Bauaufsichtliche Genehmigung.....	125
7.3	Anlagenauslegung, Unterkonstruktionen	126

7.3.1	Lastverteilung und Statik eines ebenen Aufdachsystems	127
7.3.2	Schneelastzonen und Windlastzonen nach DIN 1055 Teil 4/Teil 5	129
7.3.3	Varianten von Unterkonstruktionen	131
7.3.4	Montage.....	133
7.3.5	Häufige Fehler bei Planung und Montage	133
8	Blitz-, Überspannungsschutz und Potenzialausgleich	136
8.1	Vorbemerkung.....	136
8.2	Äußerer und innerer Blitzschutz	136
8.3	Überspannungsschutz	137
8.4	Potenzialausgleich.....	137
8.4.1	Schutzzpotenzialausgleich	137
8.4.2	Funktionspotenzialausgleich.....	137
8.4.3	Blitzschutzzpotenzialausgleich	137
8.5	Zusammenfassung: Schutzmaßnahmen.....	138
8.6	Maßnahmenübersicht – normative Einordnung	139
8.6.1	Blitzschutz-Potenzialausgleich nach DIN EN 62305.....	140
8.6.2	Potenzialausgleich nach DIN VDE 0100-712 (Stand Juni 2006)	140
8.7	Innerer Blitzschutz, Schutz vor Überspannung.....	141
8.8	Potenzialausgleich.....	141
8.8.1	Blitzschutz-Potenzialausgleich nach DIN EN 62305-3	141
8.8.2	Potenzialausgleich nach DIN VDE 0100-712 (Stand Juni 2016)	142
9	Wichtige Normen und Vorschriften.....	144
9.1	Vorbemerkung.....	144
9.2	Normen zu photovoltaischen Anlagen	145
9.3	VDE 0100 Reihe.....	146
9.3.1	DIN VDE 0100-400, DIN VDE 0100-520, VDE 0100-540, VDE 0140.....	146
9.3.2	DIN VDE 0100 – Teil 712 (Betriebsstätte PV-Anlage)	146
9.3.3	Übergabe an das Stromnetz (früher TAE- Bedingungen)	146
9.4	Spezifische Normen für Wechselrichter.....	147
9.4.1	EN 50524 Datenblatt- und Typenschildangaben	147
9.4.2	EN 50530 Wechselrichterwirkungsgrade	147
9.4.3	EN 61727 Eigenschaften der Netzschnittstelle	147
9.5	Spezifische Normen (Module, Solarzellen, Steckverbinder)	148
9.5.1	EN IEC 61215:.....	148
9.5.2	Dünnschichtmodule	149
9.5.3	EN IEC 62108 Ed. 1.0	149
9.5.4	DIN EN 50513 (VDE 0126-18): Solarscheiben – Datenblattangaben.	150
9.5.5	DIN EN 50380: Datenblatt und Typenschildangaben Module.....	150
9.5.6	DIN EN 50521;VDE 0126-3:2009-10:.....	150
9.6	Spezifische Normen für Dokumentation	151
9.6.1	DIN EN 50513: Datenblattangaben für kristalline Siliziumscheiben....	151

9.6.2	DIN VDE 62446 Juli 2010 (VDE 0126-23)	151
9.7	Bautechnische Normen – gebäudeintegrierte Photovoltaik	153
9.7.1	Bauproduktenrichtlinie (BPR), Bauproduktenverordnung (BauPVO)	153
9.7.2	Landesbauverordnungen	153
9.7.3	Normentwurf DIN VDE 0126-21 – gebäudeintegrierte Photovoltaik...	153
9.7.4	DIN 4102, Teil 1 bis Teil 16, Brandverhalten von Baustoffen.....	154
9.7.5	Dachdeckerfachregeln und dazugehörige Merkblätter und Hinweise	154
9.7.6	VDI 6012 – Befestigung von Solarmodulen auf Gebäuden.....	156
9.7.7	DIN EN 1991-1-1, DIN EN 1991-1-3 (früher DIN 1055)	156
9.8	Normen für Messungen und Prüfungen.....	157
9.8.1	DIN EN 60904-1 (VDE 0126-4-1): Messen von U-I-Kennlinien.....	157
9.8.2	DIN EN 60904-1-1 (VDE 0126-4-1-1): Mehrschichtsolargitter	157
9.8.3	DIN EN 60904-1-2 (VDE 0126-4-1-2): Doppelseitige Einrichtungen..	157
9.8.4	DIN EN 60904-3 bis DIN EN 60904-5 u. a. Strahlungsverteilung	157
9.8.5	DIN EN 60904-7 (VDE 0126-4-7): Spektrale Fehlanpassung	157
9.8.6	DIN EN 60904-8 bis DIN EN 60904-13 u. a. Elektrolumineszenz	157
9.8.7	DIN EN 60891 (VDE 0126-6:2010-10).....	157
9.9	Sicherheitsrelevante Normen	158
9.9.1	DIN EN 61730-1 (VDE 0126-30-1) Photovoltaikmodule – Aufbau	158
9.9.2	DIN EN 61730-1 Sicherheitsqualifikation – Teil 1 (Aufbau).....	159
9.9.3	DIN EN 61730-2 Sicherheitsqualifikation – Teil 2 (Prüfung)	159
9.9.4	DIN EN 60529 (VDE 0470)	159
9.9.5	DIN 62305-1, -2, -3, -4 mit Beiblättern (Blitzschutznormen).....	160
9.9.6	DIN EN 62305-3 Beiblatt 5, Blitzschutz für PV-Anlagen	160
10	Energieinstrahlung – Ertragsberechnung.....	162
10.1	Allgemeine technische Vorbemerkung	162
10.2	Elektrische Arbeit und Energie	162
10.3	Energiestrahlungsdichte.....	164
10.3.1	Grundlagen	164
10.3.2	Energiestrahlungsdichte auf ebenen und geneigten Flächen	166
10.3.3	Dacheffizienzen in Mitteleuropa (51°N, 7°O, Region Köln)	167
10.3.4	Energieinstrahlungsdichte in Deutschland	169
10.4	Wirkungsgrad und Performance Ratio	171
10.4.1	Vorbemerkung	171
10.4.2	Peakleistung (PMPP_STC) und Modulwirkungsgrad STC: η_{stc}	171
10.4.3	Berechnung des Energieertrags mit dem Jahres-Performance-Ratio	172
10.4.4	Leitungsverluste in Theorie und Praxis	174
10.4.5	Matchverluste – Mismatch (Flaschenhalseffekt)	179
10.4.6	Verschattungen	182
10.4.7	Temperaturverluste/Einstrahlungsverluste	184
10.4.8	Verschmutzung	186
10.4.9	Schnee	188

10.4.10	Spektrale Empfindlichkeit	190
10.4.11	Zusammenfassung sonstige Verluste – Einflüsse (ηsonst)	191
10.4.12	Zusammenfassung der typischen Verlustwerte	193
10.4.13	Gesamtsystemverluste	194
10.5	Ertragsberechnung	195
10.5.1	Vorbemerkung	195
10.5.2	Zahlenbeispiel 1: Abschätzung von Anlagenerträgen	195
10.5.3	Zahlenbeispiel 2: Ertragsberechnung einer netzgekoppelten Anlage ..	197
10.5.4	Reale Anlagenerträge in Mitteleuropa	198
11	Wertermittlung von PV-Anlagen	200
11.1	Vorbemerkungen zur Wertermittlung und PV-Anlagen	200
11.2	Technische Grundlagen	200
11.3	Verschiedene Arten der Wertermittlung	201
11.3.1	Ertragswert oder Kapitalwert	201
11.3.2	Verkehrswert oder Marktwert	201
11.3.3	Substanzwert	202
11.3.4	Versicherungswert – Neuwert – Zeitwert	202
11.4	Kapitalwertermittlung	203
11.4.1	Grundprinzip	203
11.4.2	Berechnung mit der Kapitalwertformel	203
11.4.3	Kapitalisierungszins	204
11.4.4	Bewertungs- und Qualitätsstichtag	204
11.4.5	Laufzeitende und Restwert	204
11.5	Einnahmen von Photovoltaikanlagen	205
11.5.1	Erzielte energetische und finanzielle Erträge	205
11.5.2	Besondere Anlagensituationen	205
11.5.3	Einnahmen durch Eigenverbrauch	205
11.5.4	Entwicklung der Einnahmen – Stromproduktion	205
11.5.5	Einnahmen und die steuerliche Situation	205
11.6	Betriebskosten photovoltaischer Anlagen	206
11.6.1	Betriebskostenarten	206
11.6.2	Prognose zukünftiger Betriebskosten	206
11.6.3	Ermittlung besonderer Betriebskosten	207
11.6.4	Reparatur und Instandhaltungskosten	207
11.6.5	Pacht	207
11.6.6	Verwaltung und kaufmännische Geschäftsführung	207
11.6.7	Büromiete	207
11.6.8	Ertrags- Anlagenüberwachung, Wachschutz	207
11.6.9	Jahresabschlusskosten/Buchhaltung	207
11.6.10	Energie-/Betriebsmittelkosten	207
11.6.11	Versicherungen	207

11.7 Der Kapitalwert – ein Rechenbeispiel.....	208
11.7.1 Bewertungstichtage und Einnahmen.....	208
11.7.2 Betriebskosten	208
11.7.3 Berechnung des Kapitalwertes	208
11.7.4 Zusammenfassung der Auswertung	210
12 Steuern sparen mit Photovoltaik	212
12.1 Einführung.....	212
12.2 Optimierung Abfindungsbesteuerung (sog. Fünftelregelung) .	213
12.3 Steuern sparen durch Einkommensverlagerungen	217
12.3.1 Durch IAB-Bildung und Inanspruchnahme der Sonder-AfA	217
12.3.2 Einkommensverlagerung durch umsatzsteuerliche Gestaltungen	218
12.4 Steuern sparen bei der Erbschaft-/Schenkungsteuer	218
12.4.1 Maximale Vermögensübertragung, Einbeziehung aller Freibeträge ..	218
12.4.2 Übertragung ohne Einbeziehung des persönlichen Freibetrags	220
12.5 Steuern sparen durch Generationensplitting mit Photovoltaik	221
12.6 Weiterführende Gestaltungsmöglichkeiten unter Eheleuten....	222
12.6.1 Doppelte IAB-Bildung durch PV-Verkauf/Kauf unter Ehegatten.....	222
12.6.2 Verdreibefachung betriebsbezogene IAB-Obergrenze bei Ehegatten ...	223
12.7 Steuerersparnis im Vergleich mit Investition in Immobilien	224
12.8 Einkommensoptimierungen bei Baukindergeld, Eltern geld	226
12.9 Flucht in Sachwerte durch Anschaffung von PV-Anlagen.....	227
12.10 Ausblick.....	228
13 Risiken und Haftung	230
13.1 Risiken und Gewährleistungs-/Garantiezeiten	230
14 Versicherung netzgekoppelter Photovoltaikanlagen	232
14.1 Üblicherweise vorhandene private Versicherungen	233
14.2 Allgemeine Bedingungen einer Elektronikversicherung.....	233
14.2.1 Versicherte Schäden und Gefahren	233
14.2.2 Ausschlüsse, nicht versicherte Schäden.....	234
14.2.3 Entschädigungsberechnung.....	234
14.2.4 Gefahrenerhöhung	235
14.3 Fazit.....	235
14.4 Zusatzausteine, sonstige Versicherungen	236
14.4.1 Ertragsausfall, versicherter Nutzungsausfall	236
14.5 Betreiberhaftpflichtversicherung	236
14.6 Montageversicherung	237
14.7 Gewährleistung BGB § 437 Rechte des Käufers bei Mängeln ..	237
14.8 Herstellergarantie	238

14.9 Technische Mängel und Schäden in der Praxis	240
14.9.1 Typische Versicherungsfälle.....	240
14.9.2 Mechanische Schäden an Modulen.....	242
14.9.3 Veränderungen im Bereich der Zelloberflächen	246
14.9.4 Beschädigungen der Dachhaut, Marderverbiss, Moduldose	251
14.9.5 Verkabelung	254
14.9.6 Potenzialinduzierte Degradation.....	256
15 Der Photovoltaikmarkt	260
15.1 Vertriebsstrukturen – Hersteller und Lieferanten.....	260
15.2 Entwicklung der Preise	262
15.3 Qualität des Angebots erkennen.....	263
15.3.1 Checkliste Angebotsbewertung	263
16 Schlusswort und Zukunftsperspektive	266
17 Anhang.....	268
17.1 Größen, Einheiten und Konstanten	268
17.1.1 Solarzellen, Module und Generatoren	268
17.1.2 Wechselrichter – elektrische Kenngrößen	270
17.1.3 Ertragsberechnung	271
17.1.4 Leitungsverluste	272
17.2 Batterien	273
17.3 Formeln	274
17.4 Abbildungen	276
17.5 Index	280
17.6 Literatur und Quellen	285