

Inhalt

1 Einführung	17
1.1 Grundlagen der solaren Strahlung	17
1.2 Globalstrahlung, Direktstrahlung, Himmelsstrahlung	19
1.3 Strahlung auf die geneigte Fläche	28
1.4 Regionale Verteilung der solaren Strahlung	31
2 Grundlagen der Photovoltaik	37
2.1 Bändermodell und photovoltaischer Effekt	37
2.2 Ersatzschaltbild der PV-Zelle, Strom-Spannungs-Kennlinien	46
2.3 Kennlinien für unterschiedliche Strahlungsdichte und Temperatur	53
2.3.1 Abhängigkeit von der Strahlungsdichte	53
2.3.2 Einfluss der Zelltemperatur	55
2.3.3 Einfluss von Temperatur und Strahlung auf die Leistung	57
2.3.4 Spektraler Wirkungsgrad	60
2.4 Typen von Solarzellen	62
2.4.1 Kristalline Siliziumzellen	62
2.4.2 Amorphe Siliziumzellen	65
2.4.3 Dünnschicht-Zellen	66
2.4.4 Andere Photovoltaikzellen und Zelltechnologien	67
3 Aufbau und Betriebsverhalten von Photovoltaikanlagen	70
3.1 Allgemeines	70
3.2 Verhalten einer Reihenverschaltung bei Verschattung	74
3.3 Parallelverschaltung von Modulen	77
3.4 Weitere elektrische Komponenten in PV-Anlagen	80

3.5 Fehlanpassungen (Mismatch)	
von Modulen und Strings	80
3.5.1 Definition	80
3.5.2 Fertigungsbedingte Toleranzen	80
3.5.3 Alterungsbedingten Kennlinienänderungen	81
3.5.4 Strahlungsinhomogenitäten	82
3.5.5 Temperaturbedingte Abweichungen der Arbeitspunkte	87
4 Wechselrichter in PV-Anlagen	89
4.1 Allgemeines	89
4.2 Netzgeführte Stromrichter	90
4.3 Selbstgeführte Stromrichter	93
4.3.1 Allgemeines	93
4.3.2 Pulsweitenmodulation	93
4.4 Gleichspannungswandler	96
4.4.1 Tiefsetzsteller	96
4.4.2 Hochsetzsteller	98
4.5 Wechselrichter in PV-Anlagen	100
4.5.1 Allgemeines	100
4.5.2 Funktioneller Aufbau von PV-Wechselrichtern	103
4.6 Wechselrichter-Wirkungsgrad	104
5 Elektrisches Betriebsverhalten	
von PV-Anlagen	113
5.1 Wechselrichterkonzepte	113
5.2 MPP-Tracking	115
5.2.1 Allgemeines	115
5.2.2 Indirektes MPP-Tracking	117
5.2.3 Direkte MPP-Tracker	117
5.3 Auslegung des Wechselrichters	120
5.3.1 Bereich des MPP-Tracking	120
5.3.2 Leistungsbereich und Wirkungsgrad	123
5.4 Netzüberwachung	124
5.5 Verschiebungsfaktor, Leistungsmanagement	126

6 Auslegung von PV-Anlagen	129
6.1 Randbedingungen	129
6.2 Modulverschaltung und Wechselrichterkonzept	133
6.2.1 Reihen- und Parallelschaltung, Teilgeneratoren	133
6.2.2 Auslegung des Wechselrichters nach der Spannung	136
6.2.3 Auslegung des Wechselrichters nach der Leistung	138
6.3 Aufstellungsort	142
6.4 Auslegung der DC-Leitungen	143
6.4.1 Allgemeines	143
6.4.2 Einkoppelte Blitzüberspannungen und Spannungsfestigkeit	143
6.4.3 Strombelastbarkeit	145
6.4.4 Auslegung von Strangsicherungen	148
6.4.5 Minimierung der Verluste	148
6.5 Auslegung der AC-Leitung	150
6.6 Anschlusskasten	150
6.7 Fehlerstrom-Schutzeinrichtung	151
6.8 Erdung und Blitzschutz von Photovoltaikanlagen	152
6.8.1 Erdung allgemein	152
6.8.2 Erdung aktiver Teile	152
6.8.3 Blitzschutz	155
7 Netzanschluss von PV-Anlagen	161
7.1 Rechtliche Rahmenbedingungen	161
7.2 Netzanschlussbedingungen – Netzbetrieb	166
7.2.1 Allgemeine Angaben	166
7.2.2 Kurzschlussströme und Schutzeinrichtungen	166
7.2.3 Blindleistungskompensation	169
7.2.4 Dynamische Netzstützung	174
7.2.5 Wirkleistungsreduzierung und Leistungsfrequenzregelung	177
7.3 Netzurückwirkungen	179
7.3.1 Zuschaltbedingte Spannungsänderungen, Spannungsanhebung	180
7.3.2 Oberschwingungen und Zwischenharmonische	181
7.3.3 Spannungsschwankungen und Flicker	189

7.3.4	Spannungsunsymmetrie	190
7.3.5	Kommutierungseinbrüche	191
7.3.6	Hochfrequente Störaussendungen	192
7.4	Beispiele	195
7.4.1	Störaussendungen von PV-Anlagen	195
7.4.2	Überlagerung von Oberschwingungsströmen	197
7.4.3	HF-Störspannungen	199
7.4.4	Einfluss der Netzüberwachung auf die Störaussendung	201
7.4.5	Flicker durch PV-Anlagen	203
8	Entwicklung der Photovoltaik, Rahmenbedingungen	204
8.1	Installierte Leistung, erzeugte Energie, wirtschaftliche Bedeutung	204
8.2	Rahmenbedingungen und Fördermöglichkeiten	206
8.2.1	Allgemeines	206
8.2.2	Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)	207
8.2.3	Weitere Fördermöglichkeiten	209
8.3	Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit	210
8.3.1	Grundsätzliches	210
8.3.2	Kreditfinanzierung	211
8.3.3	Investitionsvergleichsrechnung	212
9	Projektbeispiele	215
9.1	Photovoltaikanlage für ein Einfamilienhaus	215
9.2	PV-Anlage für ein landwirtschaftliches Wirtschaftsgebäude	219
9.3	Kleinanlage auf einem Runddach	221
	Literaturverzeichnis	226
	Anhang – Normen im Bereich Photovoltaik	231
	Stichwortverzeichnis	237