

Andreas Wagner

# Photovoltaik Engineering

Handbuch für Planung, Entwicklung und  
Anwendung

2., bearbeitete Auflage  
mit 104 Abbildungen

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Eine kurze Geschichte der Photovoltaik .....	1
1.2 Photovoltaische Anwendungstechnik .....	3
<b>2 Solares Strahlungsangebot</b> .....	<b>5</b>
2.1 Spektrum des Sonnenlichtes .....	5
2.2 Astronomische Gegebenheiten .....	6
2.3 Einstrahlung auf die Horizontale .....	22
2.4 Einstrahlung auf die geneigte Fläche.....	25
<b>3 Solargenerator</b> .....	<b>33</b>
3.1 Ersatzschaltbild und Kennlinie der Solarzelle .....	33
3.1.1 Ideale Solarzelle .....	33
3.1.2 Ersatzschaltbilder mit konzentrierten Elementen .....	35
3.2 Effektive Solarzellen-Kennlinie .....	38
3.2.1 Kennlinien-Gleichung .....	38
3.2.2 Berechnung der Gleichungsparameter.....	41
3.2.3 Approximationsfunktion für die Steigung M .....	43
3.2.4 Berechnungsbeispiel zur effektiven Solarzellen-Kennlinie.....	44
3.3 Verlustwiderstände .....	46
3.3.1 Serien-Innenwiderstand $R_s$ .....	46
3.3.2 $R_s$ -Messung unter freiem Himmel .....	48

3.3.3 $R_s$ -Messung aus nur einer Solarzellen-Kennlinie .....	49
3.3.4 Parallel-Innenwiderstand $R_p$ .....	54
3.4 Messung der Kennlinie .....	55
3.4.1 Ausgewählte Prinzipschaltbilder zur Kennlinienmessung .....	55
3.4.2 Realisierung eines Kennlinien-Messgerätes .....	60
3.5 Qualitätskontrolle vor Ort .....	64
3.5.1 Peakleistungsmessung .....	64
3.5.2 Innenwiderstandsmessung .....	68
3.6 Matchverluste .....	69
3.6.1 Verlustbegrenzung durch Bypass-Diode .....	69
3.6.2 Internes Mismatching .....	75
3.7 Verluste durch Staub-Belag .....	87
<b>4 Komponenten von PV-Systemen .....</b>	<b>91</b>
4.1 Inselssysteme und Netzeinspeisesysteme .....	91
4.2 Batterie .....	92
4.3 Laderegler .....	99
4.4 Wechselrichter .....	102
4.5 Verbraucher .....	108
<b>5 Dimensionierung von PV-Inselanlagen .....</b>	<b>109</b>
5.1 Dimensionierung des Solargenerators .....	109
5.2 Dimensionierung der Batterie .....	111
5.3 Definition der Systemverfügbarkeit .....	113
5.4 Verfügbarkeit als Zielgröße der Dimensionierung .....	116
5.5 Einfluss der Batteriegröße auf die Verfügbarkeit .....	118
5.6 Dimensionierung ausgewählter Anwendungen .....	123
5.6.1 Solare Heimsysteme .....	124
5.6.2 Dorfstromversorgungsanlagen .....	129
5.6.3 Medizin-Kühlschrank .....	133
5.6.4 Wochenendhaus .....	137
5.6.5 Einfamilien-Wohnhaus .....	144
<b>6 Energieversorgung mit PV-Anlagen .....</b>	<b>147</b>
6.1 Jahres-Energieertrag von PV-Systemen .....	147
6.2 Kosten pro Kilowattstunde .....	148
6.2.1 Aufzinsungsfaktor und Abzinsungsfaktor .....	148
6.2.2 Barwertfaktor und Wiedergewinnungsfaktor .....	150
6.3 Kosten-Annuitäten-Methode .....	152

6.4 Ländliche Elektrifizierung mit Solar-Home-Systemen .....	153
6.5 PV-Inselsystem vs. Netzerweiterung.....	154
6.6 Einfamilien-Wohnhaus .....	161
6.7 Netzeinspeisanlage.....	163
<b>7 Energie-Ertragsgutachten.....</b>	<b>167</b>
7.1 Selbstverpflichtung der Ertragsgutachter.....	167
7.1.1 Wetterdaten.....	168
7.1.2 Systemkomponenten.....	168
7.1.3 Standort, Vor-Ort-Termin, Verschattung .....	169
7.1.4 Berechnungsverfahren .....	169
7.1.5 Darstellung der Ergebnisse .....	170
7.2 Vergleichendes Gutachten von drei PV-Anlagen.....	171
7.2.1 Wohnhaus Iserlohn Sümmern, Brucknerstraße .....	171
7.2.2 Wohnhaus Iserlohn Sümmern, Uhlenburg .....	181
7.2.3 Kreuzkirche Sümmern, Kirschblütenweg.....	184
7.2.4 Zusammenfassung .....	193
<b>Anhänge.....</b>	<b>195</b>
A.1 Solares Strahlungsangebot.....	196
A.1.1 Spektrum des Sonnenlichtes .....	196
A.1.2 Astronomische Gegebenheiten .....	202
A.1.3 Deklination Januar bis Juni.....	210
A.1.4 Deklination Juli bis Dezember.....	211
A.1.5 Zeitgleichung Januar bis Juni .....	212
A.1.6 Zeitgleichung Juli bis Dezember .....	213
A.1.7 Einstrahlung auf die Horizontale .....	214
A.1.8 Einstrahlung auf geneigte Fläche.....	238
A.1.9 Jährliche Schwankung der Globalstrahlung .....	240
A.2 Solargenerator.....	242
A.2.1 Effektive Solarzellen-Kennlinie .....	242
A.2.2 PV-Modul-Datensammlung.....	244
A.3 Ursachen für Minder-Leistung.....	288
A.4 Mathcad Grundlagen.....	291
A.5 Qualitätskontrolle .....	294
A.5.1 Ermittlung der Kennwerte .....	294
A.5.2 Peakleistung.....	295
A.5.3 Serien-Innenwiderstand $R_s$ .....	297
A.5.4 Parallel-Innenwiderstand $R_p$ .....	299
A.6 Matchverluste .....	300

A.7 Anlagenkomponenten .....	307
A.7.1 Bleibatterie.....	307
A.7.2 Wechselrichter .....	308
A.8 Systemdimensionierung.....	320
A.8.1 Täglicher Energiebedarf .....	320
A.8.2 Dimensionierung der Batterie.....	320
A.8.3 Dimensionierung des Solargenerators .....	321
A.8.4 Mittlere Verfügbarkeit.....	322
A.9 Energieversorgung mit PV-Anlagen.....	325
A.9.1 Energieertrag .....	325
A.9.2 Kosten pro Kilowattstunde .....	325
A.9.3 Kosten-Annuitäten-Methode .....	326
A.10 CO <sub>2</sub> -Emission .....	328
<b>Literatur .....</b>	<b>329</b>
Literaturverzeichnis .....	329
Weiterführende Literatur .....	334
Zeitschriften.....	334
Simulations-Software .....	334
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>335</b>