
VDI-Buch

Andreas Wagner

Photovoltaik Engineering

Handbuch für Planung, Entwicklung
und Anwendung

4. Auflage

Professor Dr.-Ing. Andreas Wagner
Fachhochschule Dortmund
Fachbereich Informations- und Elektrotechnik
Sonnenstraße 96
44139 Dortmund
Deutschland
a.wagner@pv-e.de

Abbildungen: Thomas Wambach

ISBN 978-3-662-48639-9 ISBN 978-3-662-48640-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-48640-5
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999, 2006, 2010, 2015

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

In der Erstauflage wurde die ingenieurmäßige Berechenbarkeit der Kennlinie des PV-Generators zur Lösung von Anpassungsproblemen vorgestellt. In den folgenden Auflagen wurde auf die Energie-Ertragsprognose von photovoltaischen Systemen zur Netzeinspeisung ausführlicher eingegangen und es wurden Methoden für Qualitätskontrolle und Ertragsgutachten vorgestellt, beispielsweise die Peakleistungsmessung oder die Serieninnenwiderstandsmessung aus nur einer Kennlinie bei natürlicher Einstrahlung.

Da die aktuelle Leistung von der Bestrahlungsstärke auf der Modulfläche abhängt, wird jetzt auch die Möglichkeit der Ertragserrhöhung durch Nachführung der Module nach dem Sonnenlauf genauer betrachtet. Es werden Steueralgorithmen für die Nachführung auf der Nord- und Südhalbkugel der Erde vorgestellt. Am Beispiel eines Nachführsystems in Norddeutschland wird gezeigt, welcher Mehrertrag durch die Nachführung in dieser Region zu erwarten ist.

Ein besonderer Schwerpunkt ist die Behandlung photovoltaischer Inselsysteme. Es wird am Beispiel einer Relaisfunkstation auf einem abgelegenen Turm in Iserlohn gezeigt, dass auch in Deutschland eine sehr gute Verfügbarkeit während des ganzen Jahres erreicht werden kann.

Photovoltaische Inselsysteme werden vermehrt weltweit in den sonnenreicheren Regionen eingesetzt. Die Grundlage einer guten Dimensionierung ist die Kenntnis von Einstrahlungsstatistiken. Es wurden daher Einstrahlungsdaten für etwa 500 Städte in 140 Ländern aller Kontinente erfasst und im Anhang dargestellt.

Vorwort zur 1. Auflage

Photovoltaische Stromversorgungssysteme sind heute (1999) keine exotischen Anlagen mehr, deren Funktionsfähigkeit in Demonstrationsanlagen erst noch bewiesen werden muss. Es gibt inzwischen mehr als 1000 Dächer in Deutschland, staatlich gefördert z.B. im „1000-Dächer-Programm“, auf denen photovoltaische Anlagen schon seit einigen Jahren Sonnenlicht in elektrische Energie wandeln und ins öffentliche Stromversorgungsnetz einspeisen. Das 1999 initiierte 100.000-Dächer-Programm zeigt den politischen Willen, die Verbreitung von PV-Systemen noch stärker zu fördern. Auch andere Anwendungen ohne Netzanschluss haben insbesondere in den sonnenreichen Ländern in Äquatornähe einen beachtlichen kommerziellen Erfolg.

Diese erfreuliche Verbreitung photovoltaischer Anlagen wirft in der praktischen Anwendung neue Fragen auf, beispielsweise die folgende zur Qualitätskontrolle: Stimmt die Peakleistung des Solarmoduls? Wie kann aus einer Kennlinienmessung, die unter realen Umgebungsbedingungen durchgeführt wurde, die Datenblattangabe der Peakleistung, die nur unter sogenannten Standard-Testbedingungen gilt, kontrolliert werden? Standard-Testbedingungen treten in der realen Umgebungen praktisch nicht auf. Eine Umrechnung der realen Messergebnisse auf die Erwartungswerte der Ergebnisse bei Standard-Testbedingungen mit einer für technische Praxisanwendungen geforderten Genauigkeit (5%) wäre hier eine Lösung.

Der Autor des Buches stand Anfang der Achtziger-Jahre vor ähnlichen Problemen, als er in Projekten der Technischen Zusammenarbeit mit den Philippinen und Senegal bei der Erprobung und Verbreitung photovoltaischer Systeme tätig war. In Ermangelung geeigneter Fachliteratur wurden neue Methoden zur Berechnung des Solarzellenverhaltens unter realen Einstrahlungsbedingungen und Umgebungstemperaturen entwickelt. Insbesondere die Berechnung der Solarzellenkennlinie aus den Messwerten Kurzschlussstrom I_{sc} , Leerlaufspannung U_{oc} , Strom I_{pmax} und Spannung U_{pmax} im Punkt maximaler Leistung war ohne aufwändige Iterationsmethoden mit einer Genauigkeit von 1% möglich. Aufbauend auf diese Berechnungsmethode wurden weitere Lösungsmethoden für Aufgaben im Photovoltaik-Engineering entwickelt, die die Grundlage für das vorliegende Buch darstellen. Der Autor hofft, mit diesem Buch eine Lücke in der Berechnung der Solarzellenkennlinie zu schließen.

Dank sagen möchte ich meiner Frau Helga, die mir in den Auslandsjahren und bei der Verfassung des Buches durch ihre Unterstützung und durch ihr Verständnis bei auftretenden Problemen diese Arbeit ermöglichte.

Iserlohn, im Mai 1999

Andreas Wagner

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis	XI
1 Einführung	1
1.1 Eine kurze Geschichte der Photovoltaik.....	1
1.2 Photovoltaische Anwendungstechnik.....	3
1.3 Literatur	5
2 Solares Strahlungsangebot	7
2.1 Spektrum des Sonnenlichtes.....	7
2.2 Astronomische Gegebenheiten.....	8
2.3 Einstrahlung auf die Horizontale.....	26
2.4 Einstrahlung auf die geneigte Fläche	28
2.5 Einstrahlung auf die nachgeführte Fläche	36
2.6 Literatur	43
3 Solargenerator	45
3.1 Ersatzschaltbild und Kennlinie der Solarzelle.....	45
3.1.1 Ideale Solarzelle	45
3.1.2 Ersatzschaltbilder mit konzentrierten Elementen.....	47
3.2 Effektive Solarzellen-Kennlinie	50
3.2.1 Kennlinien-Gleichung	50
3.2.2 Berechnung der Gleichungsparameter	53
3.2.3 Approximationsfunktion für die Steigung M	55
3.2.4 Berechnungsbeispiel zur effektiven Solarzellen-Kennlinie	56
3.3 Verlustwiderstände.....	58
3.3.1 Serien-Innenwiderstand R_s	58
3.3.2 R_s -Messung unter freiem Himmel	60
3.3.3 R_s -Messung aus nur einer Solarzellen-Kennlinie	61
3.3.4 Einfluss der Bestrahlungsstärke auf den R_s	66
3.3.5 Parallel-Innenwiderstand R_p	68

3.4 Messung der Kennlinie.....	69
3.4.1 Ausgewählte Prinzipschaltbilder zur Kennlinienmessung	69
3.4.2 Realisierung eines Kennlinien-Messgerätes.....	74
3.5 Qualitätskontrolle vor Ort	78
3.5.1 Peakleistungsmessung.....	78
3.5.2 Innenwiderstandsmessung.....	82
3.6 Matchverluste	83
3.6.1 Verlustbegrenzung durch Bypass-Diode.....	83
3.6.2 Internes Mismatching	89
3.7 Verluste durch Staub-Belag.....	101
3.8 Literatur	104
4 Komponenten von PV-Systemen.....	107
4.1 Inselsysteme und Netzeinspeisesysteme	107
4.2 Batterie	108
4.3 Laderegler.....	115
4.4 Wechselrichter.....	118
4.4.1 Europäischer Wirkungsgrad.....	120
4.4.2 Kalifornischer Wirkungsgrad.....	122
4.4.3 Resultierender Wirkungsgrad bei Überdimensionierung	123
4.5 Verbraucher	130
4.6 Literatur	131
5 Dimensionierung von PV-Inselanlagen	133
5.1 Dimensionierung des Solargenerators.....	133
5.2 Dimensionierung der Batterie	136
5.3 Definition der Systemverfügbarkeit	137
5.4 Verfügbarkeit als Zielgröße der Dimensionierung.....	138
5.5 Einfluss der Batteriegröße auf die Verfügbarkeit.....	142
5.6 Dimensionierung ausgewählter Anwendungen	147
5.6.1 Solare Heimsysteme.....	148
5.6.2 Dorfstromversorgungsanlagen	153
5.6.3 Medizin-Kühlschrank.....	157
5.6.4 Wochenendhaus	161
5.6.5 Einfamilien-Wohnhaus.....	168
5.6.6 Relaisfunkstation.....	171
5.7 Literatur	176

6 Energieversorgung mit PV-Anlagen..... 177

6.1 Jahres-Energieertrag von PV-Systemen	177
6.2 Kosten pro Kilowattstunde	178
6.2.1 Aufzinsungsfaktor und Abzinsungsfaktor	178
6.2.2 Barwertfaktor und Wiedergewinnungsfaktor	180
6.3 Kosten-Annuitäten-Methode	182
6.4 Ländliche Elektrifizierung mit Solar-Home-Systemen	183
6.5 PV-Inselsystem vs. Netzerweiterung.....	184
6.6 Einfamilien-Wohnhaus.....	191
6.7 Netzeinspeiseanlage	193
6.8 Literatur	196

7 Energie-Ertragsgutachten 197

7.1 Selbstverpflichtung der Ertragsgutachter	197
7.1.1 Wetterdaten	198
7.1.2 Systemkomponenten	198
7.1.3 Standort, Vor-Ort-Termin, Verschattung	199
7.1.4 Berechnungsverfahren.....	199
7.1.5 Darstellung der Ergebnisse.....	200
7.2 Vergleichendes Gutachten von drei PV-Anlagen.....	201
7.2.1 Wohnhaus Iserlohn Sümmern, Brucknerstraße.....	201
7.2.2 Wohnhaus Iserlohn Sümmern, Uhlenburg	211
7.2.3 Kreuzkirche Sümmern, Kirschblütenweg	214
7.2.4 Zusammenfassung.....	223
7.3 Literatur	224

Anhang 225

A.1 Solares Strahlungsangebot.....	226
A.1.1 Spektrum des Sonnenlichtes.....	226
A.1.2 Astronomische Gegebenheiten.....	232
A.1.3 Deklination Januar bis Juni	242
A.1.4 Deklination Juli bis Dezember	243
A.1.5 Zeitgleichung Januar bis Juni	244
A.1.6 Zeitgleichung Juli bis Dezember	245
A.1.7 Einstrahlung auf die Horizontale.....	246
A.1.8 Einstrahlung auf geneigte Fläche	290
A.1.9 Jährliche Schwankung der Globalstrahlung	292

A.2 Solargenerator.....	296
A.2.1 Effektive Solarzellen-Kennlinie	296
A.2.2 PV-Modul-Datensammlung	298
A.3 Ursachen für Minder-Leistung	413
A.4 Mathcad Grundlagen	416
A.5 Qualitätskontrolle	419
A.5.1 Ermittlung der Kennwerte	419
A.5.2 Peakleistung	420
A.5.3 Serien-Innenwiderstand R_s	422
A.5.4 Parallel-Innenwiderstand R_p	424
A.6 Matchverluste	425
A.7 Anlagenkomponenten.....	432
A.7.1 Bleibatterie	432
A.7.2 Wechselrichter.....	433
A.8 Systemdimensionierung	452
A.8.1 Täglicher Energiebedarf.....	452
A.8.2 Dimensionierung der Batterie	452
A.8.3 Dimensionierung des Solargenerators.....	453
A.8.4 Mittlere Verfügbarkeit.....	454
A.9 Energieversorgung mit PV-Anlagen	457
A.9.1 Energieertrag	457
A.9.2 Kosten pro Kilowattstunde.....	457
A.9.3 Kosten-Annuitäten-Methode	458
A.10 CO ₂ -Emission.....	460
A.11 Literatur	461
Sachverzeichnis.....	463

Symbolverzeichnis

a	Verfügbarkeit
\bar{a}	mittlere Verfügbarkeit
A_F	Autonomiefaktor der Batterie
AM	Air-Mass, relative Weglänge des Sonnenlichtes durch die Erdatmosphäre
AN	Annuität einer Investition [€]
BF	Barwertfaktor
C	Kapazität einer Batterie [Ah]
C	Kapazität eines Kondensators [F]
C_N	Nennkapazität der Batterie [Ah]
c_T	Temperaturkoeffizient der maximalen Leistung
d	ein Tag, täglich
E	Bestrahlungsstärke [W/m^2]
E_0	$1000 W/m^2$ (Bestrahlungsstärke bei STC)
E_N	$800 W/m^2$ (Bestrahlungsstärke für NOCT)
F_A	Flächenfaktor
FF	Füllfaktor
\bar{G}	mittlere Einstrahlung [kWh/m^2]
G	tägliche Einstrahlung [kWh/m^2]

XII Symbolverzeichnis

GA	Jahresmittelwert der tägliche Einstrahlung [kWh/m ²]
G _{dim}	Dimensionierungs-Einstrahlung [kWh/m ²]
G _{eff}	effektive Dimensionierungs-Einstrahlung [kWh/m ²]
GM	Monatsmittelwert der tägliche Einstrahlung [kWh/m ²]
I	Strom [A]
I ₀	Sperrstrom [A]
I _D	Diodenstrom [A]
I _m	Kurzform für I _{pmax} [A]
IN	Investition [€]
I _{ph}	Photostrom [A]
I _{pmax}	Strom im Punkt maximaler Leistung [A]
I _{sc}	Kurzschlussstrom (engl. short circuit current) [A]
K _{kWh}	Kosten pro kWh [€/kWh]
M	Steigung der Solarzellenkennlinie bei I=0 [V/A]
MPP	Maximum Power Point (engl.: Punkt Maximaler Leistung)
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature [°C] Zellen-Betriebstemperatur bei T _{ambN} =20°C und E _N =800W/m ² .
n _p	Anzahl Zellen in Parallelschaltung
n _r	Anzahl Zellen in Reihenschaltung
P	Leistung [W]
P _a	Ausgangsleistung [W]
P _e	Eingangsleistung [W]

P_{eb}	Eigenbedarfs-Leistung [W]
P_{ebN}	Auf Nennleistung normierte Eigenbedarfsleistung
P_{max}	aktuelle Spitzenleistung einer Solarzelle [W]
P_N	Nennleistung [W]
P_{pk}	Peak-Power Nenn-Spitzenleistung der Solarzelle bei STC [W]
PR	Performance-Ratio (der Anlage)
PR_0	Performance-Ratio der Solarzelle
PR_{0cSi}	Performance-Ratio von kristallinen Solarzellen
PV	Photovoltaik, photovoltaisch
Q	Ladung einer Batterie [Ah]
\bar{q}	mittlerer täglicher Trübungsfaktor durch Verstaubung
q	Zinsfaktor $1+z$
R	Widerstand [Ω]
R_E	Emitterwiderstand [Ω]
R_F	Faraday-Widerstand [Ω]
R_{ib}	Innenwiderstand der Batterie [Ω]
R_p	Parallel- Innenwiderstand [Ω]
R_{pv}	Photovoltaik-Widerstand [Ω]
R_s	Serien-Innenwiderstand [Ω]
R_{se}	Selbstentladungswiderstand [Ω]
R_{sh}	Nebenwiderstand, Shunt [Ω]

R_{Ω}	ohmscher Widerstand [Ω]
S	Schalter
SHS	Solar-Home-System
STC	Standard Test Conditions Standardprüfbedingungen zur Ermittlung von P_{pk}
t	Zeit [Jahre]
T	Betriebsdauer [Jahre]
T_{amb}	Umgebungstemperatur (ambient temperature) [$^{\circ}C$]
T_j	Zellentemperatur (junction temperature) [$^{\circ}C$]
T_{j0}	$25^{\circ}C$ (Zellentemperatur bei STC)
TF	Teillastfaktor
U	Spannung [V]
U_{AC}	Wechselspannung [V]
U_b	Batteriespannung [V]
U_{BE}	Basis-Emitter-Spannung [V]
U_{bmax}	Ladeschlussspannung der Batterie [V]
U_{bmin}	Entladeschlussspannung der Batterie [V]
U_D	Diodenspannung [V]
U_{DC}	Gleichspannung [V]
U_m	Kurzform für U_{pmax} [V]
U_N	Nennspannung der Batterie [V]
U_{oc}	Leerlaufspannung (engl. open circuit voltage) [V]

U_{pmax}	Spannung im Punkt maximaler Leistung [V]
U_{st}	Steuerspannung [V]
U_T	Temperaturspannung [V]
W	Energie [kWh]
W_A	Jahresenergieertrag [kWh]
W_{bat}	Energiekapazität der Batterie [kWh]
W_d	Tagesenergieertrag zur Nutzung [kWh]
W_{el}	Tagesenergieertrag des Solargenerators [kWh]
WF	Wiedergewinnungsfaktor
z	Kalkulationszinssatz
Z	Zyklusfestigkeit der Batterie
Z_T	Teilzyklusfestigkeit der Batterie
Φ	Strahlungsfluss [W]
Θ	Einfallswinkel
ε_i	Streubreite der Ströme
ε_u	Streubreite der Spannungen
η	Wirkungsgrad
η_N	Wirkungsgrad bei Nennleistung P_N
η_{N10}	Wirkungsgrad bei 10 % der Nennleistung
η_a	Anpassungswirkungsgrad
η_{bat}	Energiewirkungsgrad der Batterie

η_{CEC}	Kalifornischer Wirkungsgrad des Wechselrichters (California Energy Commission)
η_{EUR}	Europäischer Wirkungsgrad des Wechselrichters
η_{lr}	Wirkungsgrad des Ladereglers
η_{rel}	relativer Wirkungsgrad
η_{s}	Schaltungswirkungsgrad
η_{sp}	Schaltungswirkungsgrad bei Parallelschaltung
η_{sr}	Schaltungswirkungsgrad bei Reihenschaltung
η_{wr}	Wirkungsgrad des Wechselrichters
η_0	Wirkungsgrad bei Nennbedingungen
σ	Standardabweichung der Einstrahlung [kWh/m ²]