

Teubner-Reihe Umwelt

Udo Rindelhardt

Photovoltaische Stromversorgung

Teubner-Reihe Umwelt

Herausgegeben von

Prof. Dr. mult. Dr. h. c. Müfit Bahadır, Braunschweig

Prof. Dr. Hans-Jürgen Collins, Braunschweig

Prof. Dr. Bertold Hock, Freising

Diese Buchreihe ist ein Forum für Veröffentlichungen zum gesamten Themenbereich Umwelt. Es erscheinen einführende Lehrbücher, Monographien und Forschungsberichte, die den aktuellen Stand der Wissenschaft wiedergeben.

Das inhaltliche Spektrum reicht von den naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen über umwelttechnische Fragestellungen bis hin zu juristisch, sozial- und gesellschaftswissenschaftlich ausgerichteten Titeln. Besonderer Wert wird dabei auf eine allgemeinverständliche, dennoch exakte und präzise Darstellung gelegt. Jeder Band ist in sich abgeschlossen.

Die Autoren der Reihe wenden sich vorwiegend an Studierende, Lehrende sowie in der Praxis tätige Fachleute.

Udo Rindelhardt

Photovoltaische Stromversorgung



B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei
Der Deutschen Bibliothek erhältlich.

Priv.-Doz. Dr. Udo Rindelhardt

Geboren 1946 in Nebra/Unstrut. Von 1965 bis 1972 Physikstudium an der TU Dresden. Promotion 1972, Habilitation 1986. Seit 1990 Arbeit auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien. Projektmanager am Institut für Sicherheitsforschung des Forschungszentrums Rossendorf e.V.

1. Auflage August 2001

Alle Rechte vorbehalten

© B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 2001

Der Verlag Teubner ist ein Unternehmen der Fachverlagsgruppe BertelsmannSpringer.

teubner@bertelsmann.de
www.teubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

ISBN-13:978-3-519-00411-0

e-ISBN-13:978-3-322-80044-2

DOI: 10.1007/978-3-322-80044-2

Vorwort

Die Gewährleistung einer stabilen Energieversorgung spielt eine zentrale Rolle bei der weiteren wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung der Menschheit. Neben einem spürbaren Mangel an Energie in vielen unterentwickelten Regionen ist die einfache quantitative Weiterentwicklung der bestehenden Energieversorgungssysteme mit gravierenden Nachteilen (Umweltbelastungen) verbunden. Die Einsicht in die notwendige Entwicklung neuer Energieversorgungssysteme - verbunden mit einem sparsamen Umgang mit Energie - ist heute weit verbreitet und hat global zu ersten staatlichen Lenkungsmaßnahmen geführt.

In praktisch allen für das begonnene Jahrhundert entwickelten Energieszenarien spielen die erneuerbaren Energien eine große Rolle. Speziell zur Stromerzeugung werden neben der seit Jahrzehnten genutzten Wasserkraft und der derzeit an der Schwelle zur Wirtschaftlichkeit stehenden Windkraft künftig von der Photovoltaik große Beiträge erwartet.

Obwohl die Photovoltaik seit langem bekannt und in Nischenmärkten (Erdsatelliten) seit Jahrzehnten genutzt wird, bestehen noch heute sehr große Differenzen in den Erwartungen an die mögliche massenhafte Nutzung zwischen den Befürwortern und den Kritikern dieser Technik. Die einen ermutigt das sehr große Potenzial der Photovoltaik und die nachgewiesene technische Realisierbarkeit, die anderen stellen die heute noch fehlende Wirtschaftlichkeit und den derzeit vernachlässigbaren Anteil der Photovoltaik an der weltweiten Stromversorgung in den Vordergrund. Dies führt teilweise sowohl zu unrealistischen Erwartungen als auch zu unsachlichen Argumentationen. Eine nicht immer konsequente staatliche Förderpolitik sowie widersprüchliche Entscheidungen großer Unternehmen im letzten Jahrzehnt haben speziell in Deutschland die kontinuierliche Entwicklung der Photovoltaik beeinträchtigt.

Die vorliegende Einführung verfolgt das Ziel, durch Darstellung der Möglichkeiten und der Grenzen der Photovoltaik einen Beitrag zur künftigen Nutzung dieser Technik zu leisten. Sie basiert auf Vorlesungen, die vom Autor seit 1993 an der Universität Leipzig gehalten werden. In die Vorlesungen flossen viele Ergebnisse ein, die im Rahmen eigener Forschungsarbeiten gewonnen wurden. Hervorzuheben sind hier insbesondere die Untersuchungen zum Langzeitverhalten netzgekoppelter PV-Anlagen, die im Rahmen des Bund-Länder-1000-Dächer-Photovoltaik-Programms durchgeführt wurden. Die Darstellung erfolgt primär unter energiewirtschaftlichen Gesichtspunkten, auf die Physik der Solarzelle wird deshalb nur sehr kurz eingegangen. Im Vordergrund stehen vielmehr Fragen des solaren Energieangebotes und seiner Synchronität mit dem zeitlichen Verlauf des Strombedarfes sowie die Analyse der erreichbaren Energieerträge bei der photovoltaischen Energiewandlung einschließlich der sie beeinflussenden Faktoren. Auf die heute dominierenden und absehbaren Einsatzfälle der Photovoltaik wird im Detail eingegangen.

Die gewählte Gliederung spiegelt dieses Herangehen wider. Im ersten Kapitel werden die Leistungsfähigkeit und die Defizite der bestehenden Energieversorgungssysteme dargestellt. Sie sind gewissermaßen die Messlatte für alle neuen Energietechniken. Das zweite Kapitel widmet sich dem Potenzial der Solarstrahlung. Die Schwerpunkte liegen dabei auf der Darstellung der Einstrahlung in Mitteleuropa sowie auf deren Statistik speziell in den Wintermonaten. Im bewusst kurz gehaltenen Kapitel 3 werden der photovoltaische Effekt und seine technische Umsetzung behandelt. Die energetisch relevanten Größen werden eingeführt und analysiert. Das Kapitel 4 befasst sich mit den derzeit in Nischenmärkten - auch mit wirtschaftlichem Erfolg - eingesetzten photovoltaischen Inselsystemen. Besondere Aufmerksamkeit gilt dem Aufbau und der Auslegung dieser Systeme, wobei auch auf die Eigenschaften von elektrischen Energiespeichern eingegangen wird. Im Kapitel 5 werden schließlich die netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen behandelt, von denen künftig der Hauptbeitrag der photovoltaischen Stromversorgung erbracht werden muss.

Bei der Abfassung des Werkes wurden konsequent deutsche Fachwörter verwendet, die Verbindung zum Englischen wird durchgehend im Formelzeichen sichtbar. Entsprechend den SI-Regeln werden bei Maßeinheiten keine Indizes verwendet.

Das Werk richtet sich an Studenten aller tangierten naturwissenschaftlichen und technischen Disziplinen sowie an Ingenieure und Techniker in Energieversorgungsunternehmen und Ingenieurbüros, die mit der Einführung und Anwendung der Photovoltaik befasst sind. Von dem Buch können auch andere technisch interessierte Leser profitieren, etwa Betreiber von Photovoltaik-Anlagen.

Mein Dank für ihren Anteil an Zustandekommen dieses Werkes gebührt vor allem meinen langjährigen Mitarbeitern G. Teichmann und H. Fatterschneider, die viele hier veröffentlichte Messungen und Analysen an Photovoltaik-Anlagen durchgeführt haben. Mein Dank gilt ferner den Mitarbeitern verschiedener Einrichtungen (ISFH Hameln/Emmerthal, FhG-ISE Freiburg, TÜV Rheinland Köln, IST Augsburg und WIP München), die gemeinsam mit dem Forschungszentrum Rossendorf in sehr konstruktiver Atmosphäre die wissenschaftlichen Begleituntersuchungen zum 1000-Dächer-Programm durchgeführt haben.

Schließlich danke ich meiner Frau Renate für ihre - mit viel Verzicht verbundene - Geduld beim Abfassen des Werkes.

Dresden, im Februar 2001

Udo Rindelhardt

Inhalt

Formelzeichen.....	10
1 Energieversorgungssysteme	15
1.1 Einleitung.....	15
1.2 Energieaufkommen und -umwandlungen.....	18
1.2.1 Primärenergieträger und Primärenergieströme.....	18
1.2.2 Energieflussbild.....	20
1.3 Struktur und Entwicklung des Energieverbrauches.....	23
1.3.1 Entwicklung des Weltenergieverbrauches.....	23
1.3.2 Stromnutzung.....	28
1.3.3 Perspektiven der Energieversorgung.....	32
1.4 Beiträge von erneuerbaren Energien.....	39
1.4.1 Derzeitiger Entwicklungsstand.....	39
1.4.2 Beiträge der Photovoltaik zur Stromversorgung.....	43
2 Solarstrahlung	47
2.1 Strahlungsquelle Sonne.....	47
2.2 Modulation der Solarstrahlung durch die Erdbewegungen.....	50
2.2.1 Einstrahlung auf nachgeführte Empfängerflächen.....	51
2.2.2 Einstrahlung auf fest orientierte Flächen.....	54
2.3 Terrestrische Solarstrahlung.....	56
2.3.1 Wechselwirkung der Solarstrahlung mit der Atmosphäre.....	56
2.3.2 Terrestrische Globalstrahlung.....	59
2.4 Energiemeteorologie.....	63
2.4.1 Kenngrößen.....	63
2.4.2 Komponenten der terrestrischen Strahlung.....	63
2.4.3 Energiewirtschaftliche Kenngrößen der Solarstrahlung.....	71
2.4.4 Einstrahlungsstatistik im Winter.....	74
2.4.5 Synthetische Strahlungsdaten.....	78
3 Solarzellen und Module	81
3.1 Der photovoltaische Effekt.....	81

- 3.2 Solarzellen.....88
 - 3.2.1 Wirkungsgrad von Solarzellen.....88
 - 3.2.2 Mono- und polykristalline Silizium-Solarzellen.....91
 - 3.2.3 Amorphe Silizium-Solarzellen.....98
 - 3.2.4 Weitere Solarzellen.....101
 - 3.2.5 Erreichte Parameter von Solarzellen.....102
- 3.3 Photovoltaik-Module.....103
 - 3.3.1 Aufbau von kristallinen Silizium-Modulen.....103
 - 3.3.2 Modulkennlinien und Wirkungsgrad.....105
 - 3.3.3 Verschaltung von Modulen und mismatch-Verluste.....111
 - 3.3.4 Modul-Produktion und Entsorgung.....112
- 4 Photovoltaische Inselssysteme 114**
 - 4.1 Einleitung.....114
 - 4.2 Energiespeicher.....116
 - 4.2.1 Anforderungen an Speicher in PV-Anlagen.....116
 - 4.2.2 Elektrochemische Energiespeicher.....119
 - 4.2.3 Eigenschaften und Parameter von Batterien.....122
 - 4.2.4 Laderegler.....128
 - 4.3 Auslegung von PV-Anlagen in Inselssystemen.....131
 - 4.3.1 Definitionen und Methoden.....131
 - 4.3.2 Auslegung von Anlagen im ganzjährigen Dauerbetrieb.....134
 - 4.3.3 Auslegung auf Basis meteorologischer Zeitreihen.....137
 - 4.3.4 Ergebnisse von Simulationsrechnungen.....140
 - 4.4 Betriebsergebnisse.....143
 - 4.4.1 Inselssysteme mit zeitlich konstantem Energiebedarf.....143
 - 4.4.2 Hybridanlagen.....147
 - 4.4.3 Solare Haushalt-Systeme.....148
 - 4.4.4 Photovoltaische Pumpsysteme.....149
 - 4.4.5 Solarautos und Solarflugzeuge.....152
- 5 Netzkoppelte Photovoltaik-Anlagen 156**
 - 5.1 Einleitung.....156
 - 5.2 Aufbau und Auslegung von netzgekoppelten PV-Anlagen.....157
 - 5.2.1 Aufbau einer netzgekoppelten PV-Anlage.....157
 - 5.2.2 PV-Generator.....158
 - 5.2.3 PV-Wechselrichter (Netzkoppeleinheit).....161
 - 5.2.4 Auslegung einer netzgekoppelten PV-Anlage.....166
 - 5.3 Stromerzeugung durch netzgekoppelte PV-Anlagen.....169
 - 5.3.1 Kenngrößen.....169
 - 5.3.2 Generatornennleistung.....171

5.3.3	Betriebsergebnisse kleiner Anlagen.....	175
5.3.4	Weitere Ergebnisse.....	182
5.4	Wirtschaftlichkeit und architektonische Aspekte.....	184
5.4.1	Stromgestehungskosten netzgekoppelter PV-Anlagen.....	184
5.4.2	Strombilanzen für private Haushalte (Tarifkunden).....	186
5.4.3	Architektonische und bautechnische Aspekte.....	191
	Quellenverzeichnis.....	194
	Literatur.....	196
	Sachwortverzeichnis.....	197