



TECHNIK IM FOKUS

DATEN FAKTEN HINTERGRÜNDE

Viktor Wesselak
Sebastian Voswinckel

Photovoltaik

Wie Sonne zu Strom wird



Springer Vieweg

Technik im Fokus

Technik im Fokus

Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird

Wesselak, Viktor; Voswinckel, Sebastian, ISBN 978-3-642-24296-0

Komplexität – Warum die Bahn nie pünktlich ist

Dittes, Frank-Michael, ISBN 978-3-642-23976-2

Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft?

Neles, Julia Mareike; Pistner, Christoph (Hrsg.), ISBN 978-3-642-24328-8

Energie – Die Zukunft wird erneuerbar

Schabbach, Thomas; Wesselak, Viktor, ISBN 978-3-642-24346-2

Weitere Bände zur Reihe finden Sie unter

<http://www.springer.com/series/8887>

Viktor Wesselak · Sebastian Voswinckel

Photovoltaik

Wie Sonne zu Strom wird

 **Springer** Vieweg

Viktor Wesselak
Nordhausen, Deutschland

Sebastian Voswinckel
Nordhausen, Deutschland

Konzeption der Energie-Bände in der Reihe Technik im Fokus: Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak, Institut für Regenerative Energiesysteme, Fachhochschule Nordhausen

Extra Programme unter <http://extras.springer.com/2012/978-3-642-23976-2>

ISSN 2194-0770

ISBN 978-3-642-24296-0

ISBN 978-3-642-24297-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-24297-7

Springer Berlin 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 Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, 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.

Lektorat: Eva Hestermann-Beyerle

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE.

Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

www.springer.com

Vorwort

Wie kein anderer Energiewandler ist die Solarzelle das Symbol für eine nachhaltige und umweltfreundliche Energieerzeugung. Der Umbau unseres derzeitigen, überwiegend auf fossilen und nuklearen Energieträgern beruhenden Energiesystems steht erst am Anfang. Energieeffizienz und die Nutzung erneuerbarer Energien sind dabei die wichtigsten Stellgrößen.

Kapitel 1: Warum Photovoltaik? Mit Hilfe von Solarzellen lässt sich aus der frei verfügbaren Strahlungsenergie der Sonne hochwertige elektrische Energie erzeugen. Die Photovoltaik hat sowohl technologisch als auch hinsichtlich der Stromgestehungskosten in den vergangenen zwei Jahrzehnten eine beispiellose Entwicklung gemacht. Bereits heute liegen die Kosten einer dezentralen Stromerzeugung mittels Photovoltaikanlagen auf dem Preisniveau der Endkunden-Stromtarife.

Kapitel 2: Wie groß ist die nutzbare Einstrahlung? Solarzellen nutzen mit der Strahlungsenergie der Sonne ein sowohl im Tages- als auch im Jahresverlauf stark schwankendes Energieangebot. Ebenfalls eine große Rolle spielt der geografische Ort, an dem die Nutzung der Einstrahlung erfolgen soll. Hilfsmittel wie Strahlungsatlanten erleichtern die Auslegung von Photovoltaikanlagen anhand langjähriger monatlicher Mittelwerte der Einstrahlung.

Kapitel 3: Wie funktioniert eine Solarzelle? Um die physikalischen Vorgänge in einer Solarzelle verstehen zu können, hat sich eine Beschreibung der Einstrahlung als Lichtteilchen bewährt. Je nach Energie kann ein solches Teilchen in dem Ausgangsmaterial der Solarzelle freie

Ladungsträger erzeugen. Diese werden durch ein in die Solarzelle eingebautes elektrisches Feld nach Ladung getrennt und bauen so an der Oberfläche der Zelle eine elektrische Spannung auf. Verbindet man die beiden Oberflächen leitend, so stellt sich ein zur Einstrahlung proportionaler elektrischer Stromfluss ein.

Kapitel 4: Wie werden Solarzellen hergestellt? Solarzellen unterscheiden sich hinsichtlich des verwendeten Ausgangsmaterials und des Herstellungsprozesses. Der überwiegende Anteil der Solarzellen wird aus kristallinem Silizium gefertigt. In den letzten Jahren konnte sich mit den Dünnschichttechnologien ein neuer Zelltyp auf dem Markt etablieren, der zwar einen geringeren Wirkungsgrad, aber deutlich geringere Herstellungskosten aufweist.

Kapitel 5: Wie baut man gute Photovoltaikanlagen? Solarzellen bzw. aus der Verschaltung zahlreicher Solarzellen entstandene Photovoltaikgeneratoren bilden das Herz jeder Photovoltaikanlage. Die Dimensionierung des Generators, seine Ausrichtung und das Zusammenspiel mit dem Netzeinspeisegerät sind entscheidende Faktoren, die über den Ertrag und damit über die Wirtschaftlichkeit einer Photovoltaikanlage entscheiden. Eine wichtige Rolle spielen derzeit noch Markteinführungsprogramme, wie das deutsche Erneuerbare-Energien-Gesetz.

Kapitel 6: Welche Rolle spielt Photovoltaik in der Energieversorgung der Zukunft? Die Photovoltaik ist ein wichtiger Baustein unserer zukünftigen Energieversorgung. Ihr Potential umfasst etwa ein Viertel des gegenwärtigen deutschen Strombedarfs. Davon wird derzeit nur ein Bruchteil genutzt. Wie schnell und wie umfangreich dieses Potential ausgeschöpft werden kann, hängt u. a. vom Umbau unseres Energiesystems hin zu einer überwiegend dezentralen Erzeugungsstruktur ab.

Als Autoren ist uns bewusst, dass wir mit diesem Buch nur einen kleinen Einblick in die Photovoltaik geben können. Dabei haben wir uns bemüht, weitestgehend auf eine naturwissenschaftliche und ingenieurtechnische Fachsprache zu verzichten. Eine kommentierte Literaturliste am Ende dieses Bandes ermöglicht auf unterschiedlichen Ebenen einen vertiefenden Einstieg in die Thematik.

Nordhausen, im Frühjahr 2012

*Viktor Wesselak
Sebastian Voswinckel*

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Warum Photovoltaik?	1
1.2 Kleine Geschichte der Photovoltaik	3
2 Strahlungsquelle Sonne	9
2.1 Welle oder Teilchen?	10
2.2 Strahlung und Materie	11
2.3 Strahlungsquelle Sonne	14
2.4 Der Einfluss der Erdatmosphäre	18
2.5 Strahlungsangebot auf der Erde	21
3 Die Physik der Solarzelle	27
3.1 Was ist ein Halbleiter?	27
3.2 Der Photoeffekt im Halbleiter	32
3.3 Die Solarzelle als p-n-Übergang	34
3.4 Modell einer realen Solarzelle	36
3.5 Der Wirkungsgrad und seine physikalischen Grenzen	39
4 Technologie und Trends von Solarzellen	43
4.1 Kristalline Solarzellen	43
4.2 Dünnschichtsolarzellen	50
4.3 Die Zukunft der Solarzelle	53
4.3.1 Multijunction-Zellen	54

4.3.2	Konzentrierende Solarzellen	55
4.3.3	Organische Solarzellen	56
4.3.4	Farbstoff-Solarzellen	57
5	Photovoltaikanlagen	61
5.1	Komponenten	63
5.1.1	Photovoltaikmodule	64
5.1.2	Aufständerung	69
5.1.3	Stromrichter	71
5.2	Auslegung von netzgekoppelten Anlagen	79
5.2.1	Allgemeine Auslegungsgrundsätze	82
5.2.2	Gebäudebezogene Anlagen	86
5.2.3	Freilandanlagen	90
5.3	Auslegung von Inselanlagen	95
5.3.1	Ermittlung des Energiebedarfs	96
5.3.2	Auslegung des Energiespeichers	97
5.3.3	Auslegung des Photovoltaikgenerators	99
5.4	Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen	100
5.4.1	Investitionskosten	100
5.4.2	Einspeisevergütung	102
5.4.3	Geplante Änderung des EEG zum 1. April 2012 ...	107
6	Photovoltaik in einem zukünftigen Energiesystem	111
6.1	Energiepotenzial der Photovoltaik	113
6.2	Netzintegration von Photovoltaikanlagen	114
6.3	Systemdienstleistungen von Photovoltaikanlagen	118
	Literaturauswahl	123
	Literatur	125
	Index	127

Here comes the sun, here comes the sun,
and I say it's all right.

George Harrison (1969)

1.1 Warum Photovoltaik?

Photovoltaik bezeichnet die Umwandlung von Strahlungsenergie in elektrische Energie mittels Solarzellen. Der Begriff *Photovoltaik* ist ein um 1920 aufgekommenes Kunstwort, das aus dem griechischen Wortstamm für Licht und der Einheit für die elektrische Spannung zusammengesetzt wurde.

Die Solarzelle ist eine der bemerkenswertesten Erfindungen der Ingenieurwissenschaften überhaupt: Sie wandelt die frei und überall auf der Welt kostenlos zur Verfügung stehende Sonnenstrahlung direkt in elektrische Energie um, die ihrerseits leicht in nahezu jede andere Energieform umgewandelt werden kann. Die Solarzelle kommt dabei praktisch ohne Wartung aus, da sie keine bewegten Teile besitzt oder Hilfsenergien benötigt. Ihre Lebensdauer ist so hoch, dass die Hersteller mindestens 20 Jahre Garantie geben. Zu ihrer Produktion wird vor allem Quarzsand benötigt, ein Stoff, der praktisch unbegrenzt auf der Erde vorhanden ist. Weiterhin lassen sich Solarzellen durch eine Ver-



Abb. 1.1 Einsatz von Solarzellen bei einem Kleinverbraucher im Milliwattbereich (*links*), Solarkraftwerk mit mehreren Megawatt Leistung (*rechts*)

schaltung zu Solargeneratoren einfach in der elektrischen Leistung skalieren. Diesen Vorteilen stehen derzeit jedoch noch vergleichsweise hohe Anschaffungskosten gegenüber, die sich vor allem aus dem hohen Energieeinsatz bei der Herstellung ergeben.

Das Haupteinsatzfeld von Solarzellen hat sich in den letzten 30 Jahren von kleineren und mittleren netzautarken Anwendungen, wie beispielsweise der Energieversorgung von Satelliten oder elektrischen Kleinverbrauchern (Abb. 1.1), hin zu netzgekoppelten Solarkraftwerken verlagert. Heute leisten Solarzellen einen wachsenden Beitrag zur öffentlichen Energieversorgung. Solarkraftwerke mit einer Nennleistung im Megawattbereich sind inzwischen Stand der Technik. Diese Entwicklung beruht auf erheblichen technologischen Fortschritten in der Zell- und Modulfertigung sowie der Entwicklung von leistungsfähigen Netzeinspeisegeräten und wird durch die in vielen Ländern gestarteten Markteinführungsprogramme gefördert.

Mit steigenden Produktionsmengen in der Photovoltaikindustrie gehen sinkende Preise einher. Dieser aus allen Bereichen der industriellen Produktion bekannte Effekt kann in einer sogenannten *Preis-Lernkurve* zusammengefasst werden: Abb. 1.2 zeigt den auf die Leistung bezoge-

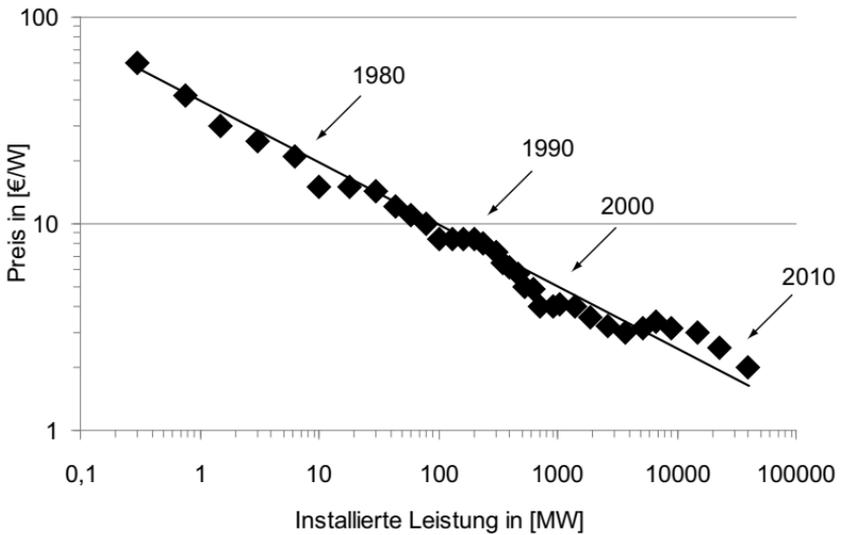


Abb. 1.2 Preis-Lernkurve von Photovoltaikmodulen aus kristallinem Silizium, nach [1]

nen Preis eines Solarmoduls aufgetragen über der insgesamt installierten Leistung. Wählt man für beide Achsen eine logarithmische Darstellung, so ergibt sich annähernd eine Gerade. Aus der Preis-Lernkurve lässt sich ablesen, dass in den vergangenen Jahrzehnten eine Verzehnfachung der installierten Leistung jeweils eine Halbierung der Preise zur Folge hatte. Gleichzeitig werden dadurch auch Prognosen über die künftige, produktionsmengenabhängige Preisentwicklung ermöglicht. In Deutschland wurde im Jahr 2012 für Haushaltskunden *Netzparität* erreicht: Das bedeutet, dass die Stromgestehungskosten von dezentralen Photovoltaikanlagen unter den Endkundenpreis von Elektrizität aus dem öffentlichen Netz gesunken sind. Tendenz: weiter fallend.

1.2 Kleine Geschichte der Photovoltaik

Die Geschichte der Photovoltaik geht zurück auf die Entdeckung des Photoeffekts durch den französischen Physiker Alexandre-Edmond

Becquerel im Jahr 1839. Becquerel beobachtete bei elektrochemischen Experimenten, dass sich der Strom in seiner Versuchsanordnung je nach Beleuchtung veränderte. Man unterscheidet den von Becquerel beobachteten *äußeren* Photoeffekt, bei dem Elektronen unter Lichteinwirkung aus einem Festkörper austreten, und den für die Photovoltaik relevanten *inneren* Photoeffekt, bei dem die Elektronen im Festkörper verbleiben, aber durch die Aufnahme von Energie in einen energiereicheren Zustand übergehen. Der innere Photoeffekt wurde erstmals 1873 in Form einer bei Beleuchtung beobachteten Veränderung des elektrischen Widerstands von Selen beschrieben. Das erste funktionsfähige Solarmodul wurde von dem amerikanischen Wissenschaftler Charles Fritts 1894 präsentiert. Das Modul hatte eine Fläche von etwa 30 cm² und bestand aus Selenzellen, die zwischen zwei Metallschichten eingebettet waren. Dabei bestand die beleuchtete Oberfläche aus einer dünnen Goldschicht. Das Modul soll einen Wirkungsgrad von einem Prozent gehabt haben.

Der Photoeffekt führte zu einem Widerspruch zu der Ende des 19. Jahrhunderts geltenden Auffassung vom Wellencharakter des Lichts, da die Energie der angeregten Elektronen von der Frequenz, aber nicht von der Amplitude des anregenden Lichts abhängt (Abschn. 2.1). Eine erste Erklärung lieferte 1905 Albert Einstein mit seiner Lichtquantenhypothese, für die er 1921 den Nobelpreis für Physik erhielt. Das theoretische Verständnis der heutigen Photovoltaik wurde in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts mit dem Konzept des p-n-Übergangs gelegt. Hier sind vor allem die grundlegenden Arbeiten des amerikanischen Physikers William Shockley und seines deutschen Kollegen Hans-Joachim Queisser hervorzuheben.

Die ersten Silizium-Solarzellen mit p-n-Übergang wurden 1953 von den Bell Laboratories entwickelt. Sie hatten einen Wirkungsgrad zwischen 4 und 6 Prozent und schafften es bis auf die Titelseite der New York Times (Abb. 1.3). Ähnliche Ergebnisse wurden kurze Zeit später auch mit Materialien wie beispielsweise Galliumarsenid erzielt. Erste Anwendungen in den 1950er Jahren waren die Stromversorgung von Telefonverstärkern sowie des amerikanischen Satelliten Vanguard 1, der neben einer Batterie zusätzlich mit Solarzellen zur Energieversorgung ausgestattet war. Der Erfolg dieses Projekts – Vanguard 1 sendete sieben Jahre Signale aus – legte den Grundstein für die kommerzielle