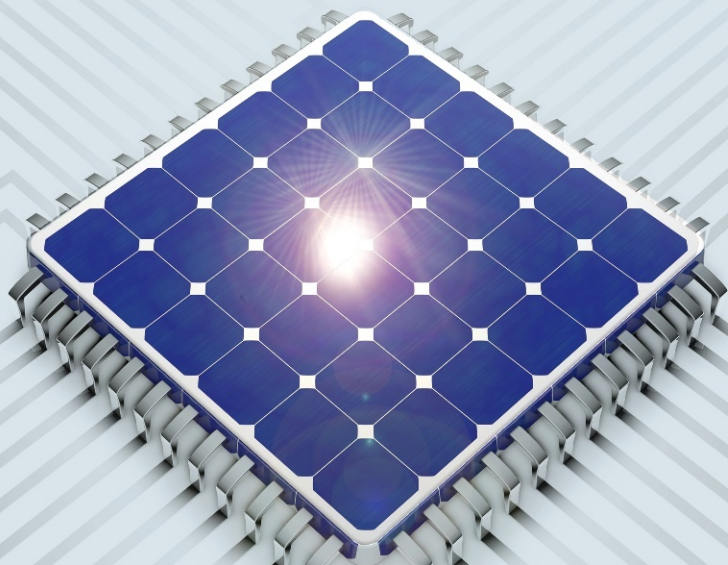


Viktor Wesselak
Sebastian Voswinckel

Photovoltaik

Wie Sonne
zu Strom wird



 Springer

Technik im Fokus

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

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

Werkstoffe – Unsichtbar, aber unverzichtbar

Weitze, Marc-Denis; Berger, Christina, ISBN 978-3-642-29540-9

Werkstoff Glas – Alter Werkstoff mit großer Zukunft

Schaeffer, Helmut; Langfeld, Roland, ISBN 978-3-642-37230-8

3D-Drucken – Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert

Fastermann, Petra, ISBN 978-3-642-40963-9

Wasserstoff und Brennstoffzellen – Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff

Lehmann, Jochen; Luschtinetz, Thomas, ISBN 978-3-642-34667-5

Weitere Bände zur Reihe finden Sie unter

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

Viktor Wesselak · Sebastian Voswinckel

Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird

2. Auflage

 Springer

Viktor Wesselak
Nordhausen, Deutschland

Sebastian Voswinkel
Nordhausen, Deutschland

ISSN 2194-0770

Technik im Fokus

ISBN 978-3-662-48905-5

DOI 10.1007/978-3-662-48906-2

ISSN 2194-0789 (electronic)

ISBN 978-3-662-48906-2 (eBook)

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 2012, 2016

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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

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. Heute liegen die Kosten der Stromerzeugung mittels Photovoltaik in Deutschland zwischen 8 und 12 Cent und damit in der Größenordnung der fossilen Energieträger – Tendenz: weiter fallend.

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 Beschrei-

bung 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 eingebauten 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 abnehmende 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 ingenieurtechnische Fachsprache zu

verzichten. Eine kommentierte Literaturliste am Ende dieses Bandes ermöglicht auf unterschiedlichen Ebenen einen vertiefenden Einstieg in die Thematik.

Nordhausen, im Winter 2015

Viktor Wesselak
Sebastian Voswinckel

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Warum Photovoltaik?	1
1.2	Kleine Geschichte der Photovoltaik	3
	Literatur	7
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	22
	Literatur	27
3	Die Physik der Solarzelle	29
3.1	Was ist ein Halbleiter?	29
3.2	Der Photoeffekt im Halbleiter	34
3.3	Die Solarzelle als p-n-Übergang	37
3.4	Modell einer realen Solarzelle	38
3.5	Der Wirkungsgrad und seine physikalischen Grenzen	41
	Literatur	43
4	Technologie und Trends von Solarzellen	45
4.1	Kristalline Solarzellen	45
4.2	Dünnschichtsolarzellen	52
4.3	Die Zukunft der Solarzelle	56
4.3.1	Multijunction-Zellen	56

4.3.2	Konzentrierende Solarzellen	57
4.3.3	Organische Solarzellen	58
4.3.4	Farbstoff-Solarzellen	60
	Literatur	62
5	Photovoltaikanlagen	63
5.1	Komponenten	65
5.1.1	Photovoltaikmodule	66
5.1.2	Ausrichtung	71
5.1.3	Stromrichter	73
5.2	Auslegung von netzgekoppelten Anlagen	82
5.2.1	Allgemeine Auslegungsgrundsätze	85
5.2.2	Gebäudebezogene Anlagen	89
5.2.3	Freilandanlagen	93
5.3	Auslegung von Inselanlagen	97
5.3.1	Ermittlung des Energiebedarfs	99
5.3.2	Auslegung des Energiespeichers	100
5.3.3	Auslegung des Photovoltaikgenerators	102
5.4	Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen	103
5.4.1	Investitionskosten	103
5.4.2	Vergütung des erzeugten Solarstroms	106
	Literatur	116
6	Photovoltaik in einem zukünftigen Energiesystem	117
6.1	Energiepotential der Photovoltaik	119
6.2	Netzintegration von Photovoltaikanlagen	121
6.3	Systemdienstleistungen von Photovoltaikanlagen	124
	Literatur	129
	Literaturauswahl	131
	Sachverzeichnis	133

*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 Verschaltung zu Solargeneratoren einfach in der elektrischen Leistung skalieren. Diesen Vor-

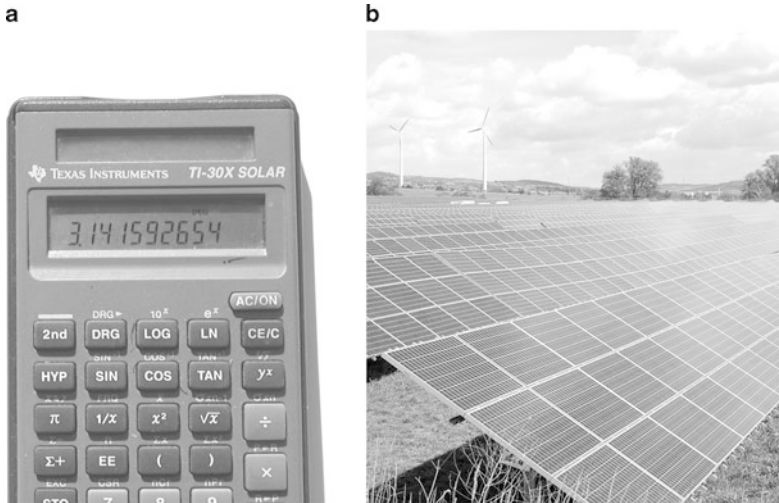


Abb. 1.1 Einsatz von Solarzellen bei einem Kleinverbraucher im Milliwattbereich (a), Solarkraftwerk mit mehreren Megawatt Leistung (b)

teilen steht jedoch die direkte Abhängigkeit der Energieerzeugung von der momentanen Sonneneinstrahlung gegenüber, die u. U. einen Energiespeicher oder die Kombination mit anderen Energieerzeugungsanlagen notwendig macht.

Das Haupteinsatzfeld von Solarzellen hat sich in den letzten 40 Jahren von kleineren und mittleren netzautarken Anwendungen, wie beispielsweise der Energieversorgung von Satelliten oder elektrischen Kleinverbrauchern (Abb. 1.1a), 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 wurde durch die in vielen Ländern gestarteten Markteinführungsprogramme befördert.

Mit steigenden Produktionsmengen in der Photovoltaikindustrie gehen sinkende Preise einher. Dieser aus allen Bereichen der industriellen

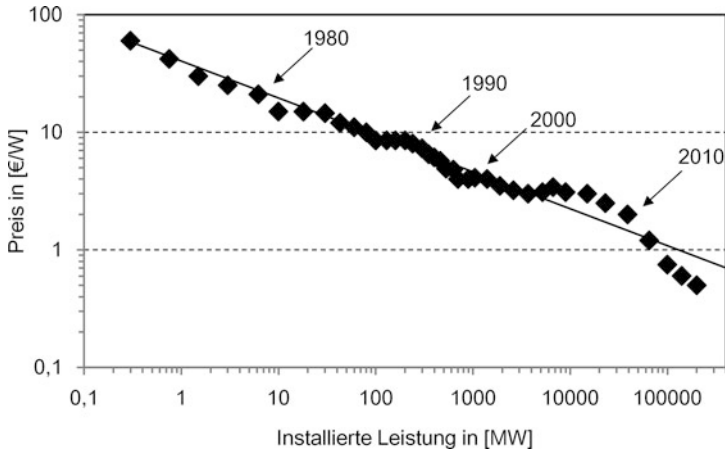


Abb. 1.2 Preis-Lernkurve von Photovoltaikmodulen aus kristallinem Silizium. (Nach Fh-ISE [1])

Produktion bekannte Effekt kann in einer sogenannten *Preis-Lernkurve* zusammengefasst werden: Abb. 1.2 zeigt den auf die Leistung bezogenen 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 kleinen 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 Bec-

querel 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 cm^2 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% 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 Solarzellenproduktion und deren Anwendung in Satelliten. Erst Mitte der 70er-

The New York Times

Vast Power of the Sun Is Tapped By Battery Using Sand Ingredient

Special to The New York Times.

MURRAY HILL, N. J., April 25—A solar battery, the first of its kind, which converts useful amounts of the sun's radiation directly and efficiently into electricity, has been constructed here by the Bell Telephone Laboratories.

The new device is a simple-looking apparatus made of strips of silicon, a principal ingredient of common sand. It may mark the beginning of a new era, leading eventually to the realization of one of mankind's most cherished dreams—the harnessing of the almost limitless energy of the sun for the uses of civilization.

they had achieved an efficiency of 6 per cent in converting sunlight directly into electricity. This, they asserted, compares favorably with the efficiency of steam and gasoline engines, in contrast with other photoelectric devices, which have a rating of no more than 1 per cent.

With improved techniques the efficiency may be expected to be increased substantially, they added. They observed that nothing is consumed or destroyed in the energy conversion process and there are no moving parts, so the solar battery "should theoretically last indefinitely."

The experimental solar battery

Abb. 1.3 Artikelausschnitt von der Titelseite der New York Times vom 26.04.1954. (Grafik: New York Times)

Jahre, als in der Folge der Ölkrise das weltweite Interesse für erneuerbare Energien wuchs, übertraf die Produktion von Solarzellen für terrestrische Zwecke die für die Raumfahrt.

Terrestrische Anwendungen beschränkten sich zunächst überwiegend auf Inselsysteme zum Betrieb von Kommunikations- und Signalanlagen, in Einzelfällen auch zur Versorgung von Siedlungen in netzfernen Gebieten. In den 1980er-Jahren nahm die Entwicklung der Photovoltaik zwei unterschiedliche Richtungen: Einerseits entstanden erste Großprojekte