



Photovoltaik

Auf Dächern, an Fassaden und als Sonnenschutz von Wohn- und Bürohäusern sind Photovoltaikanlagen heute fast schon ein alltäglicher Anblick. Die Anlagen gewinnen nicht nur Solarstrom, sondern dienen auch der architektonischen Gestaltung. Photovoltaik ist eine der Schlüsseltechnologien für eine klimaverträglichere Stromversorgung.

EINLEITUNG

In gespeicherter und umgewandelter Form kommt Sonnenenergie auf der Erde vielfältig vor: z. B. als Kohle, Erdöl und Erdgas, als Biomasse wie Holz oder Raps, ebenso als Windenergie. Lediglich die Geothermie, die Meeresenergie und die Kernenergie sind nicht-solare Energiequellen.

„Direkt“ lässt sich Sonnenenergie einerseits zur Wärmeversorgung nutzen: Entweder sammeln Solarkollektoren die Wärme „aktiv“ auf dem Dach ein und stellen sie der häuslichen Wärmeversorgung zur Verfügung oder große südorientierte Glasflächen ernten „passiv“ solare Wärme für eine komfortable Raumtemperatur. Andererseits lässt sich mit Sonnenenergie auch Strom erzeugen, der ins allgemeine Stromnetz eingespeist wird. Diese Anlagen nennt man Photovoltaikanlagen.

Bei der Photovoltaik (PV) wird in Solarzellen – dies sind spezielle Halbleiterbauelemente – Sonnenlicht (Photonen) direkt in elektrische Energie umgewandelt. Physikalisch zugrunde liegt der photovoltaische Effekt: Photonen mit geeigneter Energie können in Halbleitern (z. B. Silizium) Elektronen aus dem Atomverband lösen und damit einen Stromfluss bewirken. Um höhere Leistungen zu erzielen, werden Solarzellen zu Modulen zusammengesetzt.

Die Wechselwirkung zwischen Licht und Elektronen wurde bereits Anfang des 19. Jahrhunderts beobachtet, jedoch erst 1905 von Albert Einstein theoretisch verstanden, indem er die Quantennatur des Lichts berücksichtigte. Bereits 1883 stellte der amerikanische Erfinder Charles Fritts



Abb. 1

Ein Hochschulteam der TU Darmstadt hat 2007 mit einem „Solarhaus der Zukunft“ den internationalen Bauwettbewerb „Solardecathlon“ des US-Energieministeriums gewonnen. Der komplette Energiebedarf der Bewohner inkl. Mobilität wird aus Sonnenenergie gedeckt. Photovoltaik arbeitet hier im Verbund mit weiteren innovativen Energietechnologien. (Quelle: TU Darmstadt/Kubina, Schetter, Kovacevic)

eine Selen-Photozelle mit einem Wirkungsgrad von 1 bis 2% her. 1954 entwickelte ein Forscherteam in den Bell Telephone Laboratories eine Zelle auf der Basis des nahezu unerschöpflichen Elements Silizium. Diese Entdeckung war der Beginn der Photovoltaik. Der Bedarf der Raumfahrt nach leichten, langlebigen und autarken Stromquellen hat ab den 1960er Jahren die technologische Entwicklung der solaren Stromerzeugung dann sehr beschleunigt.

Fortschritte in der Halbleitertechnologie sowie ein wachsender Markt für PV-Anwendungen reduzierten kontinuierlich die Kosten für Solarzellen, sodass diese seit den 1980er Jahren auch für zahlreiche Anwendungen auf der Erde attraktiv wurden. Zum rapiden Ausbau der Photovoltaik in Deutschland haben die konti-

nuierliche öffentliche Forschungsförderung und die wirtschaftlich verlässlichen Einspeisetarife für Strom aus erneuerbaren Energien beigetragen. Ende 2006 sind in Deutschland ca. 300.000 PV-Anlagen installiert, etwa 35.000 Menschen arbeiten in der PV-Branche und die Exportquote liegt bei 34%. Prognosen bis zum Jahr 2020 trauen dem PV-Weltmarkt ein jährliches Wachstum von 20 – 30% zu. Die deutschen PV-Hersteller planen daher, in den kommenden Jahren ihre heimischen Produktionskapazitäten zu vervielfachen.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Sonnenstrahlung
- > Photovoltaischer Effekt
- > Solarzelle

SOLARSTRAHLUNG

Die durch Kernfusion im Sonneninneren erzeugte Energie wird wesentlich als elektromagnetische Strahlung (Photonen) in den Weltraum emittiert und nur ein winziger Bruchteil erreicht die Erde. Die durchschnittliche Strahlungsleistung an der obersten Schicht der Erdatmosphäre beträgt 1.370 W/m^2 und auf der Erdoberfläche 1.000 W/m^2 . In der Lufthülle unterliegt ein Teil der Photonen Streu- und Absorptionsprozessen, z. B. durch Wolken und Luftfeuchtigkeit (Abb. 2). Dieser Anteil des Lichts wird als diffus bezeichnet und macht

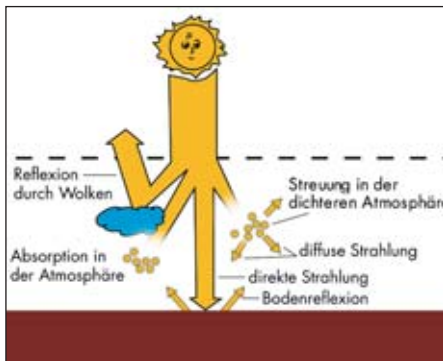


Abb. 2 Sonneneinstrahlung in der Atmosphäre. Prozesse mit Luftmolekülen wie Ozon, Wasserdampf, Staub und CO_2 führen zu diffusem Licht.

in Mitteleuropa im Jahresdurchschnitt ca. 50% aus. Solarzellen nutzen direktes und diffuses Licht.

Die Dauer der jährlichen Sonneneinstrahlung ist abhängig von der geografischen Breite. In Mitteleuropa liegt die Energie der Einstrahlung, bezogen auf eine horizontale Fläche, bei ca. 1.000 kWh/m^2 im Jahr. Der Wert für die Sahara ist mehr als doppelt so hoch, denn aufgrund der kürzeren atmosphärischen Lichtwegstrecke in Äquatornähe und des Wüstenklimas werden weniger Photonen absorbiert und reflektiert. Innerhalb Deutschlands schwankt dieser Jahreswert bei horizontalen Flächen zwischen ca. 850 kWh/m^2 in Hamburg und ca. 1.125 kWh/m^2 in Süddeutschland. Bei südorientierten, 30° geneigten Flächen beträgt er 1.050 kWh/m^2 (Hamburg) und 1.350 kWh/m^2 (Süddeutschland).

Um unter den geografischen Bedingungen Mitteleuropas möglichst effizient Strom zu erzeugen, sollten PV-Module südwärts mit einer horizontalen Neigung von ca. 35° errichtet werden (Abb. 3). Auch mit einer Abweichung von Südost bis Südwest und bei der Neigung von $\pm 20^\circ$ erreichen die Anlagen mehr als 90% ihrer Leistung. Wichtiger als die ideale Dachneigung ist ein

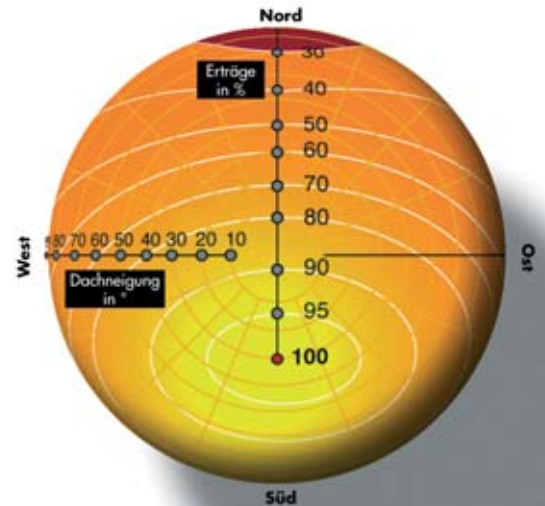


Abb. 3 Ausrichtung und Anstellwinkel der Module beeinflussen den Jahresertrag.

schattenfreier Standort (z. B. Bäume, Antennen) während der wechselnden Sonnenstände im Verlauf eines Tages und rund ums Jahr.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Solare Einstrahlung
- > Direkte und diffuse Strahlung

SOLARZELLEN

Anders als Metalle, bei denen eine äußere Spannungsquelle (z. B. Batterie) genügt, um Elektronen in eine gerichtete Bewegung zu versetzen, benötigen Halbleitermaterialien eine zusätzliche Energiezufuhr in Form von Wärme oder Licht, um stromleitend zu werden.

Solarzellen sind lichtdurchflutete Halbleiter, z. B. auf Siliziumbasis, mit einer „inneren Spannungsquelle“. Die notwendige Spannung resultiert aus zwei benachbarten Schichten, in denen jeweils negative Ladungs-

träger (n-Bereich) bzw. positive Ladungsträger (p-Bereich) überwiegen (Abb. 4). Um dies zu erreichen, werden in das Gitter aus Siliziumatomen in dünnen Oberflächenschichten geringe Mengen von Fremdatomen eingebaut (Dotierung). An der dem Licht zugewandten Seite werden in geringer Dosis Elemente eingebracht, durch die Halbleiter gut leiten (z. B. Phosphor, Arsen für den n-Bereich) und auf der anderen Seite solche, durch die sie schlecht leiten (z. B. Bor, Indium). Zwischen diesen Schichten bildet sich ein schwach p-leitender Bereich aus. Die dotierten Bereiche wirken wie eine „Membran“, d. h. Elektronen und positive Ladung (Elektronenfehlstellen) können nur in unterschiedliche Richtungen abfließen.

Dringen Photonen (Licht) in diese Zellen ein, werden dabei Elektronen angeregt, nehmen Energie auf und können sich eine Zeit lang frei bewegen. Diese freien Elektronen sind dann bewegte Ladung, also elektrischer (Gleich-)Strom. Sobald das freie bewegte Elektron dann auf eine Elektronenfehlstelle trifft, wird es wieder fest in das Atomgitter eingebunden. Daher fließt der Strom nur, solange ständig neue Photonen folgen. Die Leistung einer Solarzelle ist vor allem abhängig von der Lichtintensität sowie der

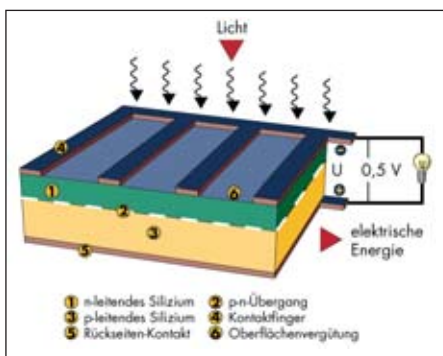


Abb. 4 Prinzipieller Aufbau einer Solarzelle mit einem die Ladungsträger trennenden p-n-Übergang. Über Metallkontakte an Unter- und belichteter Oberseite kann der Stromkreis geschlossen werden.

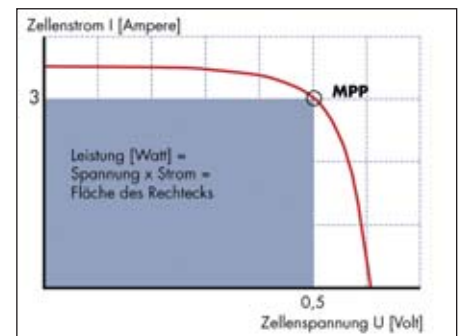


Abb. 5 Stromspannungskennlinie einer kristallinen Siliziumzelle. Sie erbringt typischerweise eine Leistung von ca. 1,5 Watt (ca. 0,5 Volt Spannung bei 3 Ampere Strom). Der „MPP“ ist der Punkt der maximalen Leistung.

Flächengröße der Zelle und kann aus der Kennlinie abgelesen werden (Abb. 5). Der Wirkungsgrad η ist definiert als das Verhältnis der von der Zelle abgegebenen elektrischen Leistung zur senkrecht auf die Zelle einfallenden Lichtleistung.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Halbleiter
- > Dotierung
- > Wirkungsgrad

PHOTOVOLTAIK-ANLAGEN

Wie aus einem Wafer, das ist die am Anfang des Herstellungsprozesses stehende, 0,2 – 0,3 mm dicke „Grundplatte“ des Halbleitermaterials, am Ende eine PV-Anlage wird, die Solarstrom ins allgemeine Netz einspeist, zeigt **Abb. 6**.

Solarzellen

Für Solarzellen können eine Vielzahl von Halbleitermaterialien verwendet werden. Weltweit beruhen noch ca. 95% aller Zellen auf der Basis von Silizium. Man unterscheidet (mono- oder poly-) kristalline Zellen, bei denen aus Siliziumkristallblöcken die Wafer gesägt werden, und amorphe Zellen, die nur wenige tausendstel Millimeter dick und deren Atome völlig ungeordnet sind.

Kristalline Zellen (Marktanteil: 88%) haben den Vorteil eines hohen elektrischen Wirkungsgrades und gut handhabbaren Herstellungsprozesses. Nachteile sind der hohe Energiebedarf bei der Siliziumschmelze (ca. 1.500 °C) sowie die Materialverluste beim Sägen der Wafer und aufgrund der erforderlichen Materialdicken der Zellen. Meistens erscheinen kristalline Zellen durch die Antireflexbeschichtung blau bis schwarz.

Amorphe Siliziumzellen gehören zu den Dünnschichtszellen (Marktanteil insgesamt: 12%), zu denen u. a. auch die Cadmium-Tellurid-Zelle oder die polykristalline-Bandsilizium-Zelle zählen. Bei diesen wird das Solarzellenmaterial als dünne Schicht bei Temperaturen zwischen 200 und 700 °C direkt auf ein Trägermaterial (z. B.

Glas, Metallfolie, Kunststoff) aufgetragen. Dünnschichtzellen haben den Vorteil, dass die Herstellung weniger Energie und Material benötigt und sich diese Zellen direkt als Großflächen in fast beliebigen Geometrien produzieren lassen. Weiterhin lassen sich auch mehrere Zellen mit Spezialisierungen auf unterschiedliche Farbbereiche des Sonnenlichts „übereinanderstapeln“ (Tandemzelle, Tripelzelle). Nachteilig ist, dass der elektrische Wirkungsgrad nur etwa halb so hoch ist wie bei den kristallinen Zellen.

Photovoltaik-Module

Typischerweise 40 – 80 Solarzellen werden zu einem PV-Modul zusammengeschaltet. Ein übliches kristallines Standardmodul hat eine Leistung von 100 – 250 Watt, eine Fläche von 0,6 – 1,8 m² und wiegt 10 – 25 kg. Bei einer Parallelschaltung vergrößert sich die Stromstärke bei gleichbleibender Spannung; durch Serienschaltung wird eine Spannungserhöhung bei gleichbleibender Stromstärke erreicht. Hierbei bestimmt die Solarzelle, die der geringsten Lichtintensität ausgesetzt ist (z. B. durch zeitweilige Verschattung), den Stromfluss und damit die Leistung des gesamten Moduls. Auf dem Markt werden derzeit 800 verschiedene Module von mehr als 100 Herstellern angeboten.

Photovoltaikanlagen

PV-Anlagen speisen weit überwiegend ins allgemeine Stromnetz ein, d. h., sie werden netzgekoppelt betrieben (**Abb. 7**). Dabei

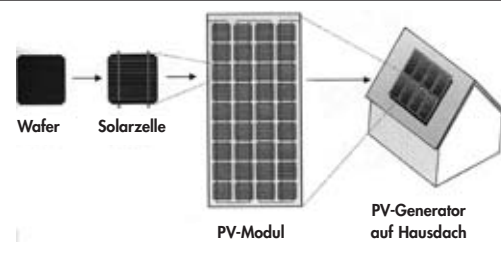


Abb. 6 Vom Siliziumwafer zur PV-Anlage

wandelt ein Wechselrichter die Modul-Gleichspannung in 230 Volt-Wechselspannung um. Wechselrichter müssen auf die jeweiligen Module abgestimmt sein und sind bislang das störanfälligste Bauteil einer PV-Anlage. Wurden bislang fast alle netzgekoppelten Anlagen auf oder an Gebäuden realisiert, so sind in letzter Zeit vermehrt sehr große Freiflächenanlagen entstanden, die idealerweise nur auf vorbelasteten Flächen (z. B. ehemalige Deponien) entstehen sollen. Der andere Teil der PV-Anlagen sind autonome Anlagen, die entweder ein netzfernes Gebäude (z. B. eine Alpenhütte) oder ein Gerät an einem netzfernen Standort (**Abb. 8**) mit Strom versorgen. Derartige Anlagen benötigen wiederaufladbare Batterien (Akkus) und Regelsysteme, die die wechselhafte Sonneneinstrahlung und Energienachfrage „managen“.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > PV-Modul
- > Netzgekoppelte Anlage
- > Autonome Anlagen

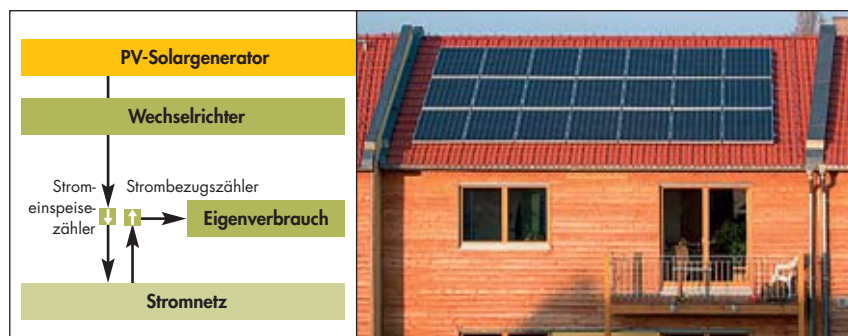


Abb. 7 Prinzipieller Aufbau einer netzgekoppelten Anlage. Nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz wird 20 Jahre der gesamte Solarstrom ins Netz eingespeist und kostendeckend vergütet, während der Eigenbedarf des Gebäudes normal aus dem Netz bezogen wird. (Quelle: BMU-Bilderdatenbank)

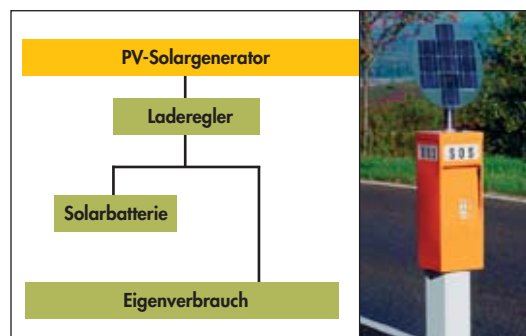


Abb. 8 Prinzipieller Aufbau einer autonomen Anlage (Insellösung)

UMWELT

Die Herstellung von Solarzellen ist aufwendig und die Verwendung giftiger Stoffe im Produktionsprozess, wie z. B. Cadmium oder Arsen, erfordert sichere Verfahren zum Schutz der Umwelt und der Gesundheit der Beschäftigten.

Je nach Zelltyp wird bei der Herstellung erst einmal mehr oder weniger Energie in die Zelle „investiert“, die sie während ihrer 25 – 40 Betriebsjahre durch Solarstrom wieder „rein-

holen“ muss. In Deutschland haben die Anlagen nach 3 – 6 Jahren den Energieverbrauch aus der Produktion wieder eingespielt (energetische Amortisation). Im Laufe des Betriebs erzeugt eine Anlage 5 – 11-mal mehr Energie als sie anfangs gekostet hat.

Nach jahrzehntelangem Betrieb müssen auch PV-Module recycelt werden. Dies ist für die Hersteller energetisch hochinteressant und andererseits wegen der verwendeten Schwer-

metalle ökotoxikologisch zwingend. Konzepte für ein Recycling sind bereits entwickelt und erste kleine Anlagen in der Erprobung. Relevante Abfallmengen werden wegen der Haltbarkeit der Module erst ab 2025 anfallen.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Energetische Amortisation
- > Recycling

In Deutschland ist die Anzahl der netzgekoppelten PV-Anlagen seit Beginn der 1990er Jahre stark gestiegen. Ende 2006 waren ca. 300.000 Anlagen installiert, die zusammen 2.800 MW_{peak} Leistung entsprechen und ungefähr 2 Mrd. kWh Strom produziert haben. Die Größe einer privaten PV-Anlage hängt nicht vom Strombedarf der Hausbewohner ab, sondern von deren Investitionsbereitschaft und der verfügbaren Dachfläche. Dabei benötigt eine Anlage mit 1 kW_{peak}, die ca. 800 – 900 kWh Strom pro Jahr erzeugt, etwa 7 – 10 m² Dachfläche. Je nach Anlagengröße, Technik und Ausstattung kostet ein kW installierter Leistung etwa 4.000 – 5.500 Euro. Seitdem Anfang der 1990er Jahre eine gesetzlich fixierte Einspeisevergütung für Solarstrom eingeführt wurde und daraufhin die industrielle Massenfertigung begann, haben sich die spezifischen Anlagenkosten bis Ende 2006 etwa halbiert. In einigen Jahren wird Solarstrom dem Markt zu gleichen Preisen wie konventioneller Strom zur Verfügung stehen (grid parity).



Abb. 9 Eine große Photovoltaikanlage in Berlin. Im Hintergrund das Bundeskanzleramt. (Bundesverband Solarwirtschaft)

Autonome Anlagen werden in Deutschland überwiegend in Geräten an netzfernen Standorten eingesetzt, wie z. B. Parkscheinautomaten. In Ländern ohne flächendeckendes Stromnetz – und dies trifft in besonderer Weise für viele ländliche Regionen Afrikas, Asiens und Lateinamerikas zu – ist eine PV-Inselanlage bereits heute eine kostengünstige und umweltfreundliche Lösung. Hier ist das Konkurrenzsystem der Dieselmotor, der die kWh Strom teurer produziert. Bei derartigen lokalen Stromnetzen können PV-Anlagen auch im Verbund, z. B. mit kleinen Windenergie- oder Wasserkraftanlagen, betrieben und später auch erweitert werden. Diese elektrische Basisversorgung, z. B. für Kommunikation, Kühlung und künstliches Licht, kann dazu beitragen, Entwicklungsschritte zu ermöglichen.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Marktentwicklung
- > Kostenreduktion
- > Netzferne Gebiete

ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

Haselhuhn, R.: Photovoltaik. Gebäude liefern Strom. FIZ Karlsruhe. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg.). Berlin : Beuth, 2010. 176 S., 6., vollständig überarb. Aufl., ISBN 978-3-410-20354-4, 24,80 Euro. BINE Informationspaket. (Früher: Berlin : Solarpraxis)

Das Bundesumweltministerium bietet über das Portal www.erneuerbare-energien.de aktuelle Informationen an. Auf dieser Seite sind auch Unterrichtsmaterialien über erneuerbare Energien eingestellt (Stichwort: Bildungsmaterialien). Das BMU fördert zum Thema Energie weiterhin folgende Portale für Kinder und Jugendliche: www.unendliche-energie.de und www.powerado.de

▼ **Herausgeber**
FIZ Karlsruhe GmbH
 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

▼ **Autor**
 Uwe Milles

▼ **ISSN**
 1438-3802

▼ **Nachdruck**
 Nachdruck des Textes zulässig bei vollständiger Quellenangabe und gegen Zusendung eines Belegexemplares – Nachdruck der Abbildungen nur mit Zustimmung der jeweils Berechtigten.

▼ **Stand**
 Dezember 2007

BINE Informationsdienst Energieforschung für die Praxis

BINE Informationsdienst berichtet zu Energieeffizienztechnologien und Erneuerbaren Energien.

In kostenfreien Broschüren, unter www.bine.info und per Newsletter zeigt die BINE-Redaktion, wie sich gute Forschungsideen in der Praxis bewähren.

BINE Informationsdienst ist ein Service von FIZ Karlsruhe und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

Kontakt

Fragen zu diesem **basisEnergieinfo?**
 Wir helfen Ihnen weiter:

Tel. 0228 92379-44



FIZ Karlsruhe, Büro Bonn
 Kaiserstraße 185 – 197
 53113 Bonn

kontakt@bine.info
www.bine.info