

## Die Solarzelle – Energie von oben

*Mit Solarzellen lässt sich geräuschlos und ohne Brennstoffverbrauch und lästige Abgase elektrischer Strom erzeugen. Das zugrundeliegende Prinzip ist zwar recht einfach, aber noch gibt es einiges zu tun, um die Solarenergie effizienter und kostengünstiger nutzen zu können.*

So wie das Sonnenlicht hat gewissermaßen auch die technische Solarenergienutzung einen Weg aus dem Weltraum hinab zur Erde zurückgelegt. Einer der ersten



**Abb. 1:** Mittlerweile lässt sich mit Solaranlagen auch im größten Maßstab Strom erzeugen. Die bläulich schimmernde Farbe der Solarzellen geht übrigens auf eine Antireflectionsschicht zurück, die auf die Oberseite aufgebracht wird. (Quelle: BSI)

Nutznießer eines autarken Stromgenerators aus Solarzellen war der 1958 getartete Satellit „Vanguard I“ – fast jeder künstliche Erdtrabant bezieht heutzutage aus Solarzellen seine Energie. Allmählich eroberten Solarzellen auch den irdischen Alltag: von Taschenrechnern und Armbanduhr bis hin zu Notrufsäulen und Parkuhren – zahlreiche Geräte des täglichen Lebens, die ausreichend mit Tageslicht in Berührung kommen, gibt es inzwischen in einer Solarvariante. Dabei lässt sich nicht nur die direkte Sonnenstrahlung nutzen, sondern auch das diffuse Licht bei bewölktem Himmel.

Auch als Alternative zu anderen Energieträgern wie die fossilen Brennstoffe ist die Sonnenenergie im Gespräch<sup>1)</sup> – immerhin liefert die Sonne in Deutschland pro Tag und Quadratmeter durchschnittlich 3 Kilowattstunden. Doch der Anteil der Photovoltaik liegt hierzulande derzeit nur bei 0,03 %. Immerhin hat sich seit 1990 die Leistung der installierten deutschen Solaranlagen von 1,5 auf über 160 MW verundertacht.

Dort, wo es kaum einen Zugang zur elektrischen Stromversorgung gibt, in Entwicklungsländern oder besonders abgelegenen Gegenden, erweist sich die Sonnenenergie als besonders vorteilhaft. Ein jüngst am

Fuße des Mount Everest eingerichtete Internetcafé nutzt natürlich die Energie der Sonne und kann so auf einen knatternden Stromgenerator verzichten.

Die physikalische Grundlage der Solarzelle, der photovoltaische Effekt, ist keineswegs neu. Bereits 1839 beobachtete Alexandre Edmond Becquerel – der Vater von Antoine Henri Becquerel, welcher die Radioaktivität entdeckte –, dass an Elektroden in alkalischen Flüssigkeiten unter Lichteinwirkung eine elektrische Spannung aufgebaut wird. Werner von Siemens erkannte schon 1877 die Bedeutung der Photovoltaik: „Wir haben es hier mit einer ganz neuen physikalischen Erscheinung zu tun, die von größter wissenschaftlichen Tragweite ist, ... da uns hier zum ersten mal die direkte Umwandlung der Energie des Lichtes in elektrische Energie gelingt“. Doch erst in den 1930er-Jahren wurde mit den Selenzellen zur Lichtmessung eine erste technische Anwendung für die Photovoltaik entwickelt.

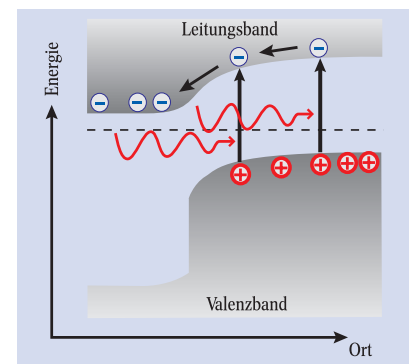
### Der innere Photoeffekt

Die entscheidende Voraussetzung für die Photovoltaik ist der innere Photoeffekt, der in Halbleitern auftritt. Durch die Absorption des Sonnenlichts erhalten die Elektronen im Valenzband genug Energie, um über die für den Halbleiter charakteristische Energielücke hinweg ins Leitungsband gehoben zu werden – natürlich nur bei ausreichender Energie der Photonen. Im Valenzband entstehen dabei Elektronen-Fehlstellen („Löcher“), die eine positive Ladung tragen.

Der Photoeffekt allein reicht aber noch nicht aus, um eine Photospannung aufzubauen, da die angeregten Elektronen ohne weiteres Zutun sehr schnell in ihren Grundzustand zurückfallen und die Löcher, die sie hinterlassen haben und die sich ebenfalls frei bewegen können, wieder füllen würden. Damit sich die Ladungen dauerhaft trennen und die Solarzelle als Spannungsquelle agiert, bedarf es noch einiger Zutaten – im wahrsten Sinne des Wortes: Durch Dotieren, also gezieltes Hinzufügen von Fremdatomen mit einem fehlenden bzw. überzähligen Valenzelektron, wird der Halbleiter in zwei Bereiche geteilt. Der eine, die n-Schicht mit einem negativen Ladungsträgerüberschuss, erleichtert lokal die Entstehung von Leitungselektronen,

der andere, die p-Schicht mit einem positiven Ladungsträgerüberschuss, die Entstehung von Löchern. Auch ohne Licht von außen werden in diesen Bereichen Ladungsträger erzeugt. Wenn diese aus ihrem Bereich in die jeweils andere Zone diffundieren, um das Gefälle der Ladungsträger in der Grenzschicht (pn-Übergang) auszugleichen, bauen die verbleibenden Atomrümpfe über die Nahtstelle der Schichten hinweg ein elektrisches Feld in der sog. Raumladungszone auf (Abb. 2).

Wenn nun das Licht auf die Solarzelle trifft, dann rekombinieren die freigesetzten Elektronen und Löcher nicht sofort wieder, sondern das innere Feld sorgt dafür, dass die beiden Partner des durch den inneren Photoeffekt entstandenen Elektron-Loch-Paares in den jeweils anziehenden Bereich wandern: Elektronen in die p-Schicht, Löcher in die n-Schicht. Die so getrennten



**Abb. 2:** Sonnenlicht erzeugt innerhalb einer Solarzelle Paare aus Elektronen im Leitungs- und Löcher im Valenzband, die durch das Raumladungsfeld des pn-Übergangs räumlich getrennt werden.

Ladungen bauen nun die dem inneren Feld entgegengerichtete Photospannung auf, die sich an den Kontakten abgreifen lässt (Abb. 3). Diese hängt von der Energielücke des Halbleiters ab und beträgt etwa ein halbes Volt bei Silizium. Die Stromstärke steigt im Gegensatz zur Spannung bei höherer Lichtstärke an; bei einer 100 Quadratmeter großen Siliziumzelle erreicht sie bei einer Bestrahlung mit 1000 W/m<sup>2</sup> etwa 2 A.

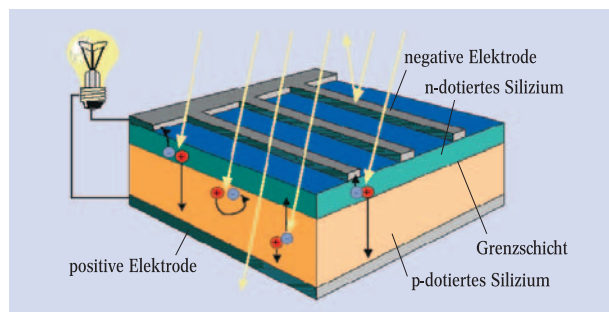
### Der solare Wirkungsgrad

Wie bei anderen Systemen zur Energiezeugung ist auch bei der Solarzelle der Wirkungsgrad entscheidend, also das Verhältnis zwischen abgegebener elektrischer Leistung zur eingestrahelten Strahlungsleistung.

1) Ein Versuch in diese Richtung ist etwa das 100000-Dächer-Programm der Bundesregierung ([www.100000daecher.de](http://www.100000daecher.de)).

tung. Theoretisch sind bei Raumtemperatur und normalem Sonnenlicht Wirkungsgrade von 30% zu erreichen. Davon sind die kommerziell erhältlichen Solarzellen allerdings noch weit entfernt.

Bei Standardsolarzellen liegt er bei etwa 10%. Legt man der Effizienzabschätzung der Solarzelle eine



**Abb. 3:** Die in der Solarzelle erzeugten Elektronen und Löcher wandern in die p- bzw. n-dotierte Schicht und bauen an den Elektroden eine Spannung auf.

Sonnenscheinintensität in unseren Breiten von  $200 \text{ W/m}^2$  bei bedecktem und  $1000 \text{ W/m}^2$  bei freiem Himmel zugrunde, ergibt das Leistungen zwischen  $20$  und  $100 \text{ W/m}^2$ . Eine Solarzellenfläche von einem Quadratmeter wandelt also eine Stunde strahlenden Sonnenschein in  $0,1$  Kilowattstunden (kWh) Solarstrom um. Im Laufe eines Jahres sind das durchschnittlich  $75$ – $90$  Kilowattstunden pro Quadratmeter Solarmodul mit  $10\%$  Wirkungsgrad.

In Anwendungen, bei denen höhere Spannungen bzw. Leistungen benötigt werden, schaltet man einzelne Solarzellen entweder in Reihe (höhere Spannung) oder parallel (höherer Strom) zu Modulen zusammen. Die miteinander verschalteten Solarzellen sind meist in transparentes Ethylen-Vinyl-Acetat eingebettet, mit einem Rahmen versehen und mit Glas abgedeckt.

Der Energieertrag eines Solarmoduls hängt von zahlreichen Faktoren ab: So nimmt die Photo-

stromdichte mit der Beleuchtungsstärke zu. Damit erhöht sich auch der Wirkungsgrad der Solarzelle. Dies ist der Grund für den Einsatz so genannter Konzentratoren, die das Sonnenlicht um bis zu tausendfach verstärken. Ein Vorteil dieser Konzentratorzellen ist, dass sie preisgünstiger sind als Solarzellen

mit entsprechender Fläche. Allerdings müssen diese Zellen stark gekühlt werden, da die Photospannung, und damit der Wirkungsgrad, sehr stark temperaturabhängig sind.

### Vielfalt der Materialien

Die heutzutage etablierte Photovoltaik-Technik ist mit vielen verschiedenen Halbleitermaterialien erhältlich. Dabei halten mono- und multikristalline Zellen aus Silizium immer noch den größten Marktanteil. Aus „Monozellen“ wurden schon die ersten Solarmodule der Raumfahrt aufgebaut, und noch heute kommen sie dort zum Einsatz, wo besonders hohe Effizienz gefragt ist – ihr Wirkungsgrad erreicht bis zu  $18\%$ . Die monokristallinen Scheiben, die sog. Wafer, werden aus einem Zylinder geschnitten, der aus geschmolzenem hochreinen Silizium gezogen wird. Multikristalline Solarzellen werden aus erkalteten Siliziumblöcken hergestellt, die eine Vielzahl unterschiedlich großer und ausgerichteter

Kristalle enthalten. Dieses Verfahren ist energiesparender und damit billiger als die Herstellung monokristalliner Zellen, sodass die multikristallinen Zellen am weitesten verbreitet sind. Allerdings ist ihr Wirkungsgrad nicht so gut (etwa  $15\%$ ), verursacht durch Kristalldefekte, die an den Grenzen der unterschiedlichen Kristallstrukturen auftreten.

Noch sehr neu auf dem Markt sind die so genannten amorphen oder Dünnschichtzellen, bei denen eine Siliziumschicht auf ein Trägermaterial wie Glas aufgetragen wird. Die Schichtdicken beträgt dabei weniger als ein Mikrometer, also nur den hundertsten Teil eines menschlichen Haares. Allein deswegen sind die Produktionskosten von Dünnschichtzellen schon erheblich geringer. Leider auch der Wirkungsgrad, der deutlich unter  $10\%$  liegt. Dünnschichtzellen finden deshalb vor allem Anwendung im Kleinleistungsbereich, z. B. bei Uhren oder Taschenrechnern, und als Fassadenelemente.

Viele Photonen, die zwar auf die Zelle auftreffen, können nicht genutzt werden, da ihre Quantenenergie entweder nicht ausreicht, um Ladungsträger zu aktivieren, oder in nutzloser Wärme verpufft. Im mühsamen Kampf um jedes Prozent Wirkungsgrad versucht man deshalb, unterschiedliche Halbleitermaterialien (z. B. Galliumarsenid und Gallium-Antimon) in sog. Tandem- oder Stapelzellen anzuordnen, um ein breiteres Strahlungsspektrum nutzen zu können. Forscher hoffen damit, die magische  $30\%$ -Grenze des Wirkungsgrades zu überspringen.

ULRICH KILIAN

Dr. Ulrich Kilian,  
science & more  
redaktionsbüro,  
uk@science-and-  
more.de