

Lass die Sonne in Dein Haus

Sauberer Strom mittels Fotovoltaik

Birgit Bomfleur, ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR
Camerloherstraße 19, 85737 Ismaning
www.ScienceUp.de

Probleme wie die globale Erwärmung oder Umweltverschmutzung lassen die Forderung nach umweltschonenden Energiequellen laut werden. Dazu zählt auch die Fotovoltaik – Energiegewinnung aus Sonnenlicht.

Quantenmechanik – was geht mich die an? Die ist doch was für verrückte Naturwissenschaftler, die sich mit dem Aufbau von Atomen oder Atomkernen beschäftigen. Aber uns Normalsterbliche betrifft die doch gar nicht. Und einen Nutzen bringt sie uns auch nicht.

Denkt man. Stimmt aber nicht. Eine Vielzahl heutiger Technologien lässt sich nur mit Hilfe der Quantenmechanik erklären, und Einiges wäre wohl ohne die Quantenmechanik nicht entwickelt worden.

Zum Beispiel der Laser. Die Einsatzgebiete des Lasers reichen vom ‘einfachen‘ Laserpointer über die medizinische Diagnostik bis hin zur Astronomie. Die Quantenmechanik der Festkörper hat zur Entwicklung von Transistorradios, Farbfernseher oder Computer geführt.

Auch die Fotovoltaik lässt sich mit Hilfe der Quantenmechanik verstehen. Fotovoltaik ist eine saubere Form der Energiegewinnung – fast ohne Umweltverschmutzung und Lärm.

Unsere Energie beziehen wir überwiegend aus den so genannten fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Aufgrund der damit verbundenen Umweltbelastungen spielen erneuerbare (auch: regenerative) Energien eine immer größere Rolle. Dazu zählt auch die Sonnenenergie.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Energie des Sonnenlichts zu nutzen. Sonnenkollektoren wandeln die Sonnenenergie in Wärme um, die man zur Erwärmung von Wasser verwenden kann. Durch einen geeigneten Aufbau kann man mit Sonnenkollektoren Dampf erzeugen und diesen in einer Turbine mit Generator zur Erzeugung von Strom verwenden. Eine weitere Möglichkeit der Sonnenenergie-Nutzung ist die Fotovoltaik.

Fotovoltaik

Bei der direkten Umwandlung des Sonnenlichtes in elektrische Energie spricht man von Fotovoltaik. Durch Bestrahlung einer Solarzelle wird unter Ausnutzung des ‘inneren Fotoeffekts‘ – diesen werden wir später genauer unter die Lupe nehmen – nutzbarer Strom erzeugt. Solarzellen

sind spezielle Halbleiterfotoelemente. Diese bestehen zum Beispiel aus dünnen Scheiben von Galliumarsenid- oder Siliziumkristallen, die gezielt mit Fremdatomen versetzt (dotiert) sind. Typische monokristalline Solarzellen haben meist einen Durchmesser von etwa 10 cm. Damit kann ein Taschenrechner betrieben werden. Um jedoch eine nennenswerte elektrische Leistung zu erzielen, werden viele solcher Zellen leitend zu einem Solarzellen- oder Fotovoltaik-Modul verschiedenster Größen und Leistungen verbunden.

Zur Zeit sind überwiegend kristalline und amorphe Silizium-Solarzellen im Einsatz. Die Solarbranche verwendet dafür bisher überwiegend Abfälle der Chip-Produktion. Dieses Silizium ist eigentlich zu rein und somit zu teuer für die Produktion von Solarzellen. Die Solarindustrie setzt daher auf den Aufbau einer eigenen Siliziumproduktion [SZ Nr. 94, 23. April 2002].

Mittlerweile werden auch andere Varianten von Solarzellen erforscht. So entwickelten Ghassan Jabbour und seine Kollegen ein Verfahren, um hauchdünne organische Solarzellen auf eine Oberfläche – zum Beispiel auf eine Tapete – aufzutragen [S.E. Shaheen, R. Radspinner, N. Peyghambarian, G.E. Jabbour, Applied Physics Letter, 79, 2996 (2001)]. Diese Solarzellen arbeiten zwar weniger effektiv als herkömmliche, sind jedoch um einiges billiger und flexibler. Wie auf den Webseiten des Magazins EE Times berichtet wurde, ist es Ghassan Jabbour und seiner Gruppe sogar gelungen, organische Solarzellen mit Hilfe eines herkömmlichen Tintenstrahldruckers zu drucken [R. Colin Johnson, EE Times, www.eetimes.com, 10. April 2002]. Bis zur kommerziellen Nutzung dieser Techniken werden wohl noch einige Forschungsjahre vergehen.

Doch was hat Fotovoltaik mit Quantenmechanik zu tun? Wir wollen uns nun Schritt für Schritt an die Physik der Fotovoltaik heranarbeiten. Dazu befassen wir uns mit Halbleitern, dem Photoeffekt und der Dotierung. Und dazu benötigen wir die Quantenmechanik. Zu guter Letzt sind wir dann in der Lage, den Aufbau und die Funktionsweise einer Solarzelle – Baustein einer Fotovoltaik-Anlage – zu verstehen.

Metalle, Halbleiter und Isolatoren

Ein elektrischer Strom in einem Festkörper ist ein Fluss von Ladungsträgern wie Elektronen oder positiv geladene Löcher. Je nach Beweglichkeit der Ladungsträger unterscheidet man Metalle, Halbleiter und Isolatoren.

Metalle wie zum Beispiel Eisen, Kupfer, Silber oder Aluminium sind gute elektrische Leiter. Sie besitzen viele leicht bewegliche Leitungselektronen. Isolatoren wie Glas, die meisten Kunststoffe oder Keramik besitzen keine Leitungselektronen und leiten den elektrischen Strom praktisch nicht. Zwischen diesen Gruppen ist die Gruppe der Halbleiter angesiedelt, zu der auch Silizium oder Germanium gehören. Sie leiten den Strom, aber um Größenordnungen schlechter als Metalle.

Die elektrische Leitfähigkeit kann im Rahmen des Bändermodells anschaulich beschrieben werden. In einem Atom dürfen die Elektronen nur Quantenzustände mit diskreten Energiewerten (Atomorbitale, Energieniveaus) besetzen. In einem Festkörper liegen jedoch sehr viele solcher Quantenzustände vor, die gruppenweise so eng beieinander liegen, dass man sie als quasi-kontinuierliche Energiebänder mit einer endlichen Energiebreite auffassen kann. Für die elektri-

sche Leitfähigkeit sind die äußeren Elektronen der Festkörper-Atome – die Valenzelektronen – von Bedeutung. Diese befinden sich in dem Valenzband des Festkörpers. Energetisch höhere Bänder werden als Leitungsband bezeichnet. Gute elektrische Leitfähigkeit wie in Metallen tritt auf, wenn das Valenzband nur teilweise gefüllt ist (Abb. 1a) oder Valenz- und Leitungsband sich teilweise überlappen. In Isolatoren ist das Valenzband vollständig gefüllt und die Energielücke zum leeren Leitungsband zu groß, um von einer merklichen Anzahl Elektronen übersprungen zu werden (Abb. 1b). In einem Halbleiter ist die Energielücke zwischen den beiden Bändern so gering (etwa 1 bis 2 eV), dass die Elektronen sehr leicht, zum Beispiel durch Wärme- oder Lichtzufuhr, von dem gefüllten Valenzband in das Leitungsband wechseln können (Abb. 1c). Dort angelangt, können sie sich leicht bewegen und tragen somit zur Leitfähigkeit bei.

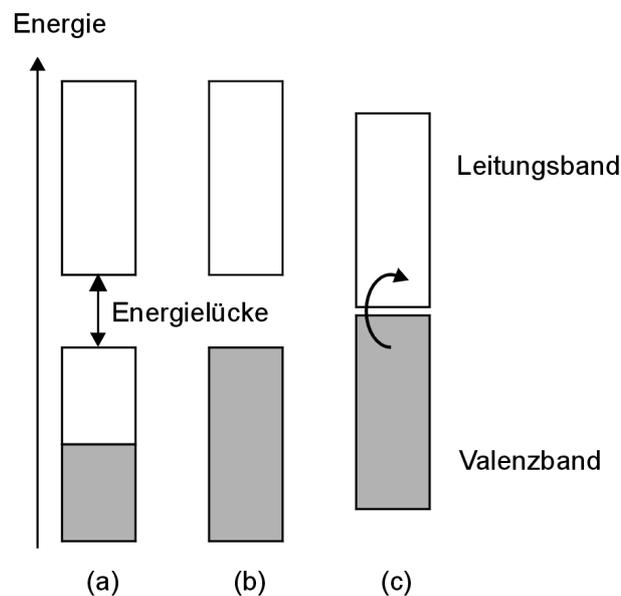


Abbildung 1: Valenz- und Leitfähigkeitsbänder für ein Metall (a), einen Isolator (b) und einen Halbleiter (c). Die grauen Flächen sind mit Elektronen gefüllt.

Was passiert nun, wenn wir einen Halbleiter bestrahlen?

Der innere Fotoeffekt

Licht besteht aus einzelnen (unteilbaren) Energiequanten, den Photonen. Die Energie E eines einzelnen Photons beträgt $h\nu$, wobei h das Planksche Wirkungsquantum und ν die Frequenz des Lichtes ist. Um in einen Halbleiter ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband anzuregen (Abb. 2), wird ein Photon benötigt, dessen Energie $E=h\nu$ mindestens der Energielücke im Halbleiter entspricht: Licht genügend hoher Frequenz muss eingestrahlt werden. Es genügt also nicht, die Intensität von niederfrequentem Licht zu erhöhen, um diesen Übergang zu initiieren. Dies führt lediglich zu einer Erhöhung der Photonen-Anzahl.

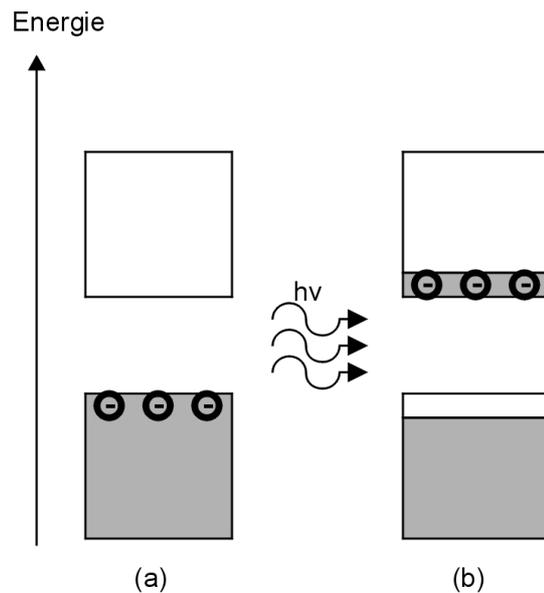


Abbildung 2: Der innere Photoeffekt. Durch Einstrahlung von elektromagnetischer Strahlung – also Licht – genügend hoher Frequenz werden Elektronen aus dem Valenz- in das Leitungsband angeregt (b).

Dotierung

Durch gezielte ‘Verunreinigung’ von Halbleitern mit Fremdatomen (Dotierung) entstehen zusätzliche Energieniveaus innerhalb der Energielücke, wodurch die elektrische Leitfähigkeit stark beeinflusst werden kann. Man unterscheidet zwei Arten der Dotierung: n-Dotierung und p-Dotierung.

Jedes Silizium-Atom besitzt vier Valenzelektronen, mit denen es im Kristall vier Bindungen zu vier benachbarten Silizium-Atomen eingeht. Diese Valenzelektronen füllen das Valenzband nahezu vollständig auf. Wird im Silizium-Kristall ein Silizium-Atom durch ein Fremdatom mit fünf Valenzelektronen – ein so genannter Donator, zum Beispiel Phosphor – ersetzt, dann bleibt ein Elektron übrig, da ja nur vier zur Ausbildung der chemischen Bindungen im Kristall notwendig sind. Dieses Elektron ist nur recht schwach an das Phosphor-Atom gebunden und somit leicht beweglich. Betrachtet man die Bänder bzw. Energieniveaus des Kristalls, so passiert Folgendes: Ein neues Niveau bildet sich knapp unterhalb des Leitungsbandes (Abb. 3a). Ein Elektron in diesem Energieniveau benötigt nur wenig Energie, um ins Leitungsband angehoben zu werden. Die Leitfähigkeit des Halbleiters steigt dadurch stark an. Man nennt solche Halbleiter n-Leiter, da die zusätzliche Leitfähigkeit durch einen Überschuss an leicht beweglichen (negativen) Elektronen hervorgerufen wird.

Ebenso kann man im Silizium-Kristall ein Silizium-Atom durch ein Fremdatom mit nur drei Valenzelektronen – ein Akzeptor, zum Beispiel Bor – ersetzen. In diesem Fall fehlt ein Elektron für die Ausbildung der vier Bindungen in dem Kristall. Wird diese Lücke durch ein Elektron aus der Nachbarschaft ersetzt, so hinterlässt dieses Elektron ein positives Loch. Das Bor-Atom ist negativ geladen, das positive Loch ist schwach an das Bor-Atom gebunden. Die Netto-Ladung

ist natürlich wie bei der n-Dotierung gleich Null. In der Sprache der Bänder-Theorie erzeugen die Bor-Atome Akzeptor-Niveaus knapp überhalb des Valenzbandes (Abb. 3b). Elektronen aus dem Valenzband werden leicht in dieses Niveau angehoben und hinterlassen im Valenzband positive Löcher, in die andere Valenzelektronen hineinspringen können. In diesem Fall sind es also die Löcher, die beschwingt auf Wanderschaft gehen. Auch solche Löcher tragen zur elektrischen Leitfähigkeit bei: Die Löcherwanderung entspricht einer Elektronenwanderung in entgegengesetzter Richtung. Solche Halbleiter werden deshalb als p-Leiter bezeichnet (p von positiv).

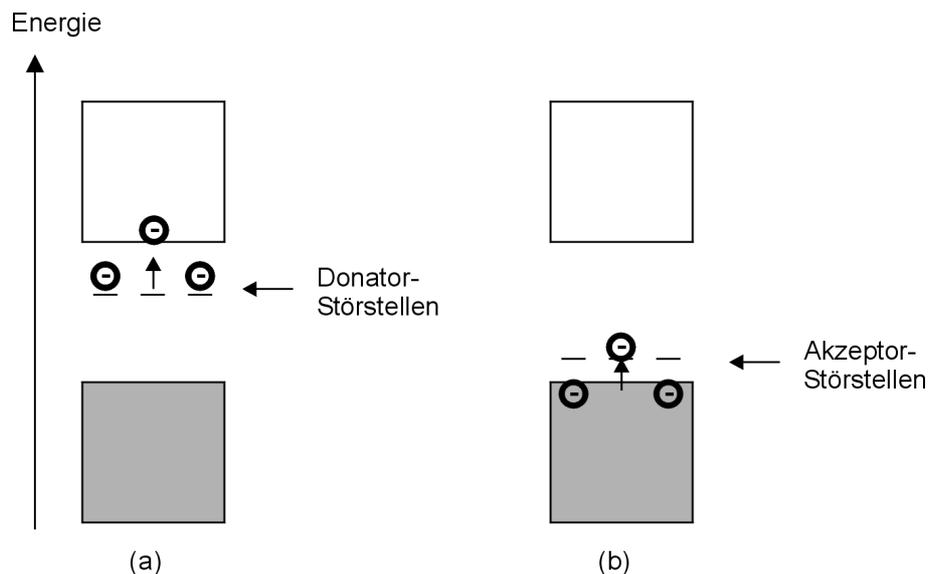


Abbildung 3: In einem n-Leiter besitzt jedes Fremdatom ein überschüssiges Valenzelektron (a). Der p-Leiter ist mit Fremdatomen dotiert, die ein Elektron weniger besitzen (b).

N- und p-dotierte Materialien sind wählerisch. Ein n-Leiter ist leitfähig für Elektronen und nicht leitfähig für Löcher. Ein p-Leiter hingegen ist ein Leiter für Löcher, aber ein Nichtleiter für Elektronen.

Die Diffusionslänge

Nun sind wir fast am Ziel. Eine Solarzelle ist nämlich auf einer Seite p- und auf der anderen Seite n-dotiert. Und auf eine Solarzelle fällt Licht. Was passiert also, wenn Licht auf einen p- oder n-Leiter fällt? Wir betrachten einen p-Leiter.

Ein Photon mit hinreichender Energie erzeugt im p-Leiter ein Elektron und ein Loch (Abb. 4a). Natürlich haben wir es mit mehreren Photonen zu tun, und somit auch mit mehreren Elektron-Loch-Paaren. An der „Produktionsstelle“ hat sich die Konzentration der Ladungsträger im Vergleich zur Umgebung erhöht. Dem Konzentrationsgefälle folgend, wollen Elektronen und Löcher ausschwärmen. Die Löcher haben damit kein Problem, sie befinden sich ja in einem

Lochleiter. Die Elektronen haben es da schwerer, der p-Leiter leitet Elektronen nur sehr schlecht. Sie bremsen die Löcher aufgrund der elektrostatischen Anziehungskraft ab, die Löcher hingegen zerrn die Elektronen mit sich. Die Elektron-Loch-Paare bleiben somit eng beieinander und bewegen sich nur langsam.

Aber es geschieht noch etwas anderes: die Rekombination. Ein Elektron und ein Loch vernichten sich unter Erzeugung eines Photons (Abb. 4b). Das ist die Umkehrung des Photoeffektes. Da dieser Prozess gehemmt ist, findet er nicht sofort nach der Erzeugung des Elektron-Loch-Paares statt. Es bleibt etwas Zeit für die Ladungsträger, sich von der Produktionsstelle zu entfernen. Der Weg, den ein Elektron im Mittel zurück legt, bis es sich wieder mit einem Loch vereint, nennt man Diffusionslänge des Elektrons. Bei Silizium beträgt sie etwa 0,1 mm.

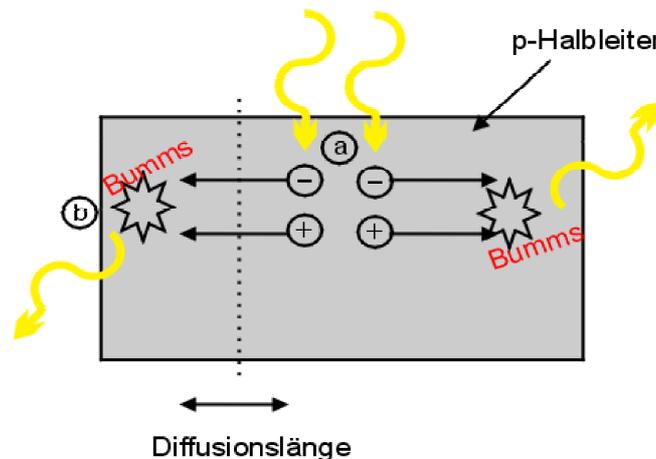


Abbildung 4: Wenn Licht auf einen p-Leiter fällt, werden Elektron-Loch-Paare erzeugt (a). Nachdem diese eine gewisse Strecke zurück gelegt haben, vernichten sich Elektron und Loch wieder unter Erzeugung eines Photons (b). An der gestrichelten Linie ist ein idealer Platz für den pn-Übergang in einer Solarzelle (siehe nächsten Absatz).

Die Solarzelle

Jetzt haben wir aus einem Photon ein Elektron-Loch-Paar erzeugt und dieses unter Erzeugung eines Photons wieder vernichtet. Was soll also der ganze Aufwand? Um Strom zu gewinnen, muss die Rekombination verhindert werden. Und das bewirkt die Kombination aus p- und n-Leiter, ein sogenannter pn-Halbleiter - zum Beispiel Silizium, welches auf der einen Seite p- und auf der anderen Seite n-dotiert ist. Befindet sich der pn-Übergang in einem Abstand von der Produktionsstelle der Elektron-Loch-Paare, der kürzer als die Diffusionslänge des Elektrons ist (gestrichelte Linie in Abb. 4), so passiert Folgendes (Abb. 5):

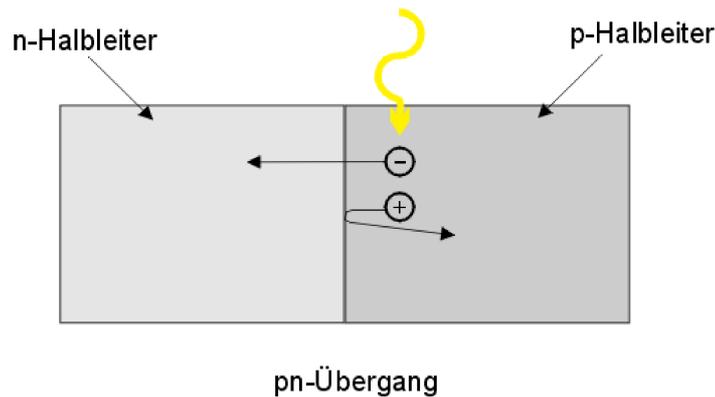


Abbildung 5: Licht trifft auf einen pn-Halbleiter.

Ein Elektron, welches den pn-Übergang erreicht, kann nun in den n-Leiter wechseln und dort unbeschwert nach links ziehen. Das Loch hingegen hat hier keine Chance, da der n-Halbleiter allein für Elektronen leitfähig ist. Es kann sich nur verabschieden und sich nach rechts durch den p-Leiter bewegen.

Den gleichen Effekt erreichen wir, wenn Licht in das n-Gebiet in die Nähe des pn-Übergangs fällt. Die Elektronen bewegen sich auch dann nach links und die Löcher nach rechts.

Nun ist es an der Zeit, die Solarzelle zusammenzubasteln. In Abbildung 6 ist der Aufbau einer Solarzelle skizziert. Eine dünne Scheibe (Wafer, etwa 0,3 mm) aus Silizium ist an der Oberfläche n-dotiert. Die untere Hälfte ist p-dotiert. Die n-Schicht muss dünn genug sein, damit die Sonnenstrahlung bis zur pn-Grenzschicht vordringen kann.

Fällt Sonnenstrahlung in der Nähe des pn-Übergangs auf die Zelle, so kommt es aufgrund des inneren Fotoeffekts zu einer Neubildung von Elektron-Loch-Paaren. Die beweglichen Ladungen werden infolge des Konzentrationsgefälles getrennt: Das Elektron wandert zum n-Leiter, dieser wird zum Minus-Pol. Das Loch wandert zum p-Leiter, der den Plus-Pol bildet. Ist ein elektrischer Verbraucher an die Kontakte der Zelle angeschlossen, wird über ihn ein elektrischer Stromkreislauf geschlossen. Es fließt Strom, und die Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren kann weiter gehen.

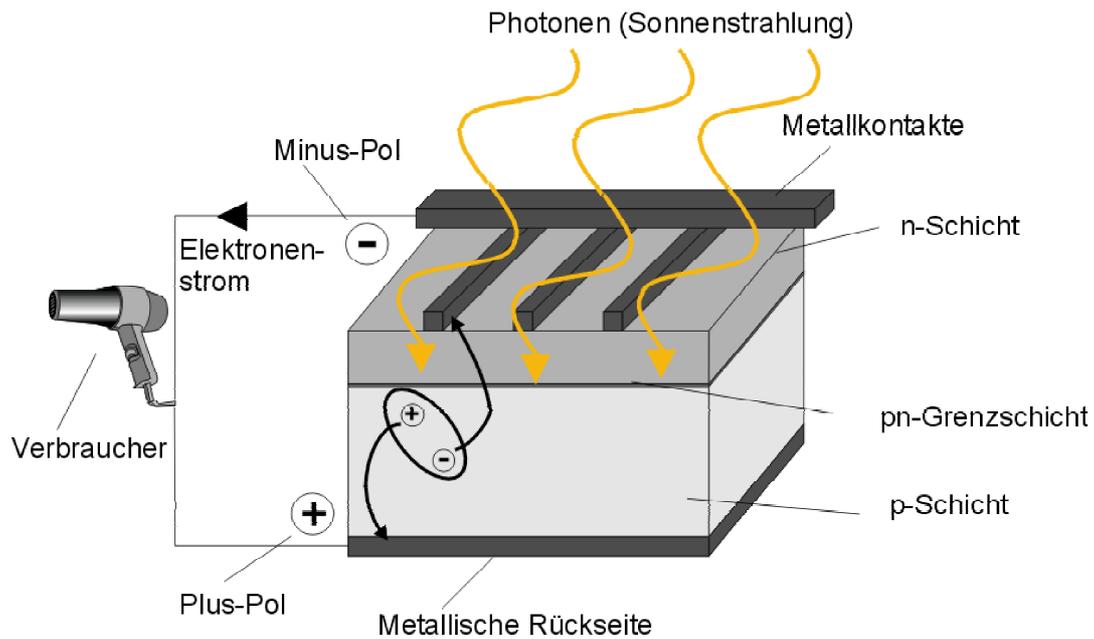


Abbildung 6: Aufbau und Funktionsweise einer monokristallinen Solarzelle.

Übrigens kann man die Solarzelle bzw. den inneren Fotoeffekt auch ‘umgekehrt’ nutzen. Die Leuchtdiode, die man ja von vielfältigen Anwendungen wie der leuchtenden Zifferanzeige eines Radioweckers kennt, ist ein Halbleiterelement wie die Solarzelle, die bei einer angelegten Spannung Licht abstrahlt.

Monokristalline Solarzellen besitzen einen Wirkungsgrad von 15-18%. Polykristalline und amorphe Solarzellen weisen einerseits einen geringeren Wirkungsgrad auf, sind aber günstiger in der Herstellung. Fotovoltaik ist besonders für eine dezentrale Energieerzeugung geeignet. Jeder kann ein Energieerzeuger werden, sich eine Fotovoltaik-Anlage auf das Dach bauen und damit (hoffentlich) Geld verdienen. In Deutschland kann die erzeugte Energie aufgrund des EEG (Erneuerbare Energie Gesetz) in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Der Energieversorger ist verpflichtet, den Strom für einen gesetzlich vorgeschriebenen Preis abzunehmen – und dieser liegt deutlich über den Preis, den man selber für den ‘eingekauften’ Strom zahlen muss. Natürlich kann man den Strom auch selber nutzen. In schlecht erschlossenen Regionen wie zum Beispiel auf Berghütten oder auch in Schrebergärten und Wohnmobilen kann dies sehr nützlich sein – damit sie überall Ihren Computer anschließen und diesen Newsletter erhalten können. Den Telefonanschluss setzen wir mal voraus ...

Birgit Bomfleur

© 2002 ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR, Alle Rechte vorbehalten. Nichtkommerzieller Nachdruck und Wiedergabe gestattet bei Quellenangabe ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR, www.ScienceUp.de.