

# Sonnenenergie aus der Kraft des Schwefels

NIKOLAUS MEYER

*Solarmodule bestehen aus kristallinem Silizium. Ihre Produktion ist materialintensiv und prozesstechnisch aufwendig. Das Hahn-Meitner-Institut Berlin hat eine Dünnschichttechnologie entwickelt, die interessante Kostenperspektiven bietet. Das Technologieunternehmen Sulfurcell baut nun eine Pilotproduktion auf, um die Technologie industriell anzuwenden..*

## 1. Innovative Solarzellen aus hochabsorbierender Schwefelverbindung

Die Absorption von Sonnenlicht ist der wichtigste Schritt der photovoltaischen Energieerzeugung: Nur absorbiertes Licht kann in elektrische Energie umgewandelt werden. Silizium ist ein Halbleiter und absorbiert Licht nur dann, wenn die Energie des Lichtquants (*Photon*) größer ist als die Bandlücke des Materials, so dass ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben werden kann und die Energie des Photons aufnimmt (*Generation*). In kristallinem Silizium als so genannter *indirekter Halbleiter* setzt dieser Übergang außerdem voraus, dass das thermisch schwingende Kristallgitter den Impuls des Elektrons verändert. Da die gleichzeitige Veränderung von Energieniveau und Impuls unwahrscheinlich ist, bedarf es 0.3 mm dicker Scheiben aus kristallinem Silizium (*Wafer*), um das Sonnenlicht vollständig zu absorbieren.

Für photovoltaische Anwendungen sind daher so genannte *direkte Halbleiter* interessanter. Bei diesen müssen die Valenzelektronen nicht ihren Impuls ändern, um Energie aufnehmen zu können. Zu dieser Gruppe gehört der Chalkopyrit Kupferindiumdisulfid ( $\text{CuInS}_2$ , kurz: CIS), eine Halbleiterverbindung aus Kupfer, Indium und Schwefel. Im Vergleich zur herkömmlichen Siliziumtechnologie reduziert sich Bedarf an Halbleitermaterial auf etwa ein Hundertstel. Zudem korrespondiert die Bandlücke des Materials (1.5 eV) mit dem Sonnenspektrum, so dass ein maximaler Anteil des Sonnenlichts zur photovoltaischen Energieumwandlung beitragen kann. Absorptionsvermögen und Bandlücke qualifizieren CIS in idealer Weise als Absorbermaterial für Solarzellen.

Sind durch die Lichtabsorption negativ geladene Elektronen in das Leitungsband gehoben worden, entsteht im Valenzband eine entsprechende positive Ladung, die sich aus Quasi-Teilchen, so genannten *Lö-*

*chern*, zusammensetzt. Der zweite Schritt der photovoltaischen Energieumwandlung besteht nun darin, Elektronen und Löcher zu trennen. Ein so genannter *pn-Übergang* übernimmt diese Aufgabe und wird hergestellt, indem der p-leitende Absorber mit einem n-leitenden zweiten Halbleiter in Verbindung gebracht wird. In einem pn-Übergang bildet sich ein Feld aus, das Elektronen und Löcher trennt. Im Fall der CIS-Solarzelle wird als n-leitender Halbleiter Zinkoxid ( $\text{ZnO}$ ) verwendet. Wie in einer Batterie sammeln sich unter Lichteinstrahlung im Zinkoxid die negativen Ladungsträger und im Absorber die positiven.

Um die erzeugte Energie nutzbar zu machen, sind die Ladungsträger einem externen Stromkreis zuführen. Dazu ist der pn-Übergang mit elektrischen Kontakten auszustatten – im Fall des CIS/ $\text{ZnO}$ -Übergangs mit einem Rückkontakt aus Molybdän und einem Frontkontakt aus hochleitendem Zinkoxid (n- $\text{ZnO}$ ) (*Sammlung*).

Halbleiterphysikalisch beschreibt die Struktur Mo/CIS/ $\text{ZnO}$ /n- $\text{ZnO}$  die CIS-Solarzelle vollständig. In der Praxis hat sich gezeigt, dass sie nur dann gute Solarzellen liefert, wenn an der Grenzfläche von CIS und  $\text{ZnO}$  eine hauchdünne Pufferschicht abgeschieden wird. Die Funktion dieser Pufferschicht ist bis heute ungeklärt. Anders als Silizium, das zu den am besten erforschten Materialien gehört, ist CIS ein „junges“ Material: Einige grundlegende Eigenschaften sind noch unbekannt und bedürfen der weiteren wissenschaftlichen Erforschung. Technologisch ist die CIS-Solarzelle jedoch bereits heute interessant, auch wenn ihr theoretisches Potential noch nicht ausgeschöpft ist.

## 2. Glasveredelung statt Wafertechnologie

Glas ist der Grundstoff einer CIS-Solarzelle und durch Glasveredelung wird aus dem passiven Baustoff ein stromerzeugendes Solarmodul. CIS-Solarzellen aus Wafern herzustellen, ist schon wegen der geringen notwendigen Materialdicke von 1  $\mu\text{m}$  weder möglich noch sinnvoll. Stattdessen dient Glas als kostengünstiges Trägermaterial, und die einzelnen Materialien der Solarzelle werden schichtweise auf der Glasoberfläche aufgetragen. Insgesamt hat das polykristalline Schicht-

paket eine Dicke von etwa 3  $\mu\text{m}$  – die CIS-Technologie ist eine Dünnschichttechnologie.

Im wissenschaftlichen Maßstab werden dünne Schichten häufig hergestellt, indem das Material thermisch verdampft und auf dem Glas zur Kondensation gebracht wird. Industriell ist dies ein aufwendiger Weg, da die Maschinen mit hohen Temperaturen umgehen müssen – Kupfer verdampft erst bei über 1300 °C – und die Beschichtungsraten schwer manipulierbar sind. In der Glasbranche hat sich daher die Methode der Kathodenzerstäubung, das so genannte *Sputtern*, etabliert: Für dieses Verfahren wird das benötigte Material in Blockform in eine Hochvakuumanlage eingebracht und dient als Kathode eines elektrischen Felds, in das ein Edelgas eingeleitet wird. Ist das Feld groß genug, ionisiert das Gas, ein Plasma entzündet sich und die ionisierten Gasmoleküle werden in Richtung der Kathode beschleunigt. Durch den Aufprall wird das Kathodenmaterial „zerstäubt“ und ähnlich einer thermischen Verdampfung gelangt es in die Gasphase. Auf dem kalten Glas gegenüber der Kathode scheidet sich das zerstäubte Material ab. Plasma und Geometrie können so angepasst werden, dass Schichten hoher elektronischer und optischer Qualität entstehen, die sich über Flächen von mehreren Quadratmetern erstrecken.

Sputtertechnologie wird eingesetzt, um die Molybdän- und Zinkoxidschichten einer CIS-Solarzelle herzustellen; das Sputtern der CIS-Verbindung selbst ist noch nicht gelungen. Um dennoch auch bei ihrer Herstellung die Vorteile des Sputterns nutzen zu können, hat das Hahn-Meitner-Institut einen zweistufigen Herstellungsprozess entwickelt: Zunächst werden lediglich Vorläuferschichten aus Kupfer und Indium aufgebracht – hierfür kann Sputtertechnik eingesetzt werden. Dieser Schritt legt die Schichtdicke und Zusammensetzung der späteren CIS-Schicht bereits fest und das Sputtern beugt dem Entstehen inhomogener Schichten vor. Um die CIS-Verbindung auszubilden, werden die Vorläuferschichten unter einer Atmosphäre aus verdampftem Schwefel auf 500 °C aufgeheizt. Die hohe Reaktivität des Schwefels führt dazu, dass sich während dieses Prozesses innerhalb von wenigen Minuten die Verbindung Kupferindiumdisulfid (CIS) ausbildet.

Eine einzelne CIS-Solarzelle ist heute in der Lage, unter voller mittäglicher Sonneneinstrahlung eine Leistung von etwa 13 mW/cm<sup>2</sup> zu erzeugen. Hätte die Solarzelle die Fläche von einem Quadratmeter entstände ein Strom von bis zu 200 A und eine Spannung von 0.65 V. Diese hohe Stromstärke würde die Leistungsverluste in den stromführenden Elementen der Solarzelle in die Höhe treiben. Daher wird für ein großflächiges Photovoltaikenelement die Fläche in einzelne Solarzellen aufgeteilt, die seriell zum Modul verschaltet werden. Anders als in der Siliziumtechnologie kann diese Serien-

verschaltung in den Herstellungsprozess integriert werden: Nach Herstellung der Rückelektrode, nach Abscheidung des Puffers und nach Präparation der Frontelektrode werden leicht gegeneinander versetzte Linien in das Material geschnitten. Dadurch entstehen streifenförmige Solarzellen von 5 - 10 mm Breite, die durch einen schmalen Kontakt ihrer Frontelektroden mit der Rückelektrode der Nachbarzelle verbunden sind und wie hintereinander geschaltete Batterien arbeiten.

### 3. CIS-Technologie an der Schwelle zur industriellen Anwendung

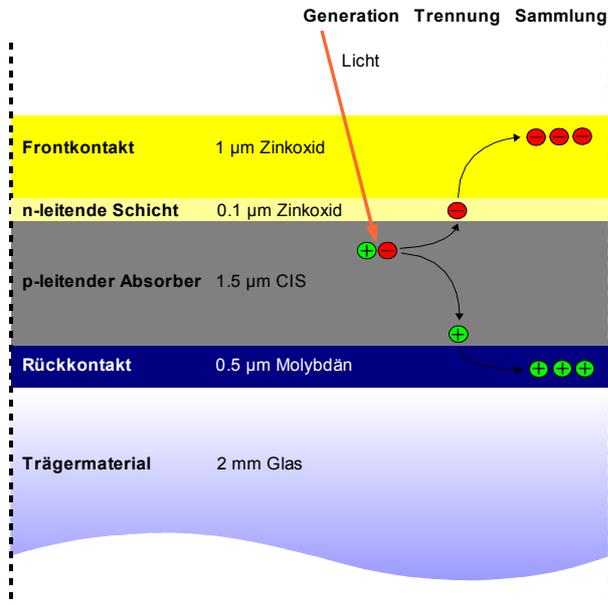
Im Labor des Hahn-Meitner-Instituts erreichen 5 x 5 cm<sup>2</sup> große CIS-Module einen Wirkungsgrad von 10 % [1]. Sie sind in der Lage, 10 % des eingestrahnten Sonnenlichts in Strom umzuwandeln. Das theoretische Limit von 25 % ist noch nicht erreicht; der Modulwirkungsgrad reicht aber an den Wert kommerzieller Silizium-Module heran (13 - 15 %).

Industriell interessant ist die CIS-Technologie wegen ihrer Material- und Verfahrensvorteile: 99 % weniger Material, rund ein Drittel weniger Prozessschritte und ein um zwei Drittel reduzierter Energieverbrauch überkompensieren den Wirkungsgradnachteil, der gegenüber herkömmlichen Modulen besteht. Unabhängige Marktbeobachter wie die Schweizer Bank Sarasin heben daher die Kostenvorteile der Technologie hervor und prognostizieren eine bedeutende Marktposition [2].

Wissenschaftler des Hahn-Meitner-Instituts und ein Konsortium privater und öffentlicher Investoren haben das Unternehmen Sulfurcell auf den Weg gebracht: Im Mai 2003 wurde begonnen, die CIS-Technologie auf großen Flächen anzuwenden und eine Pilotproduktion zu errichten. Die bevorstehende industrielle Entwicklungsarbeit birgt anspruchsvolle Aufgaben: So ist ein großflächiger schneller Heizprozess zu entwickeln, ein stabiler Produktionsprozess zu etablieren und ein Verfahren zur Modulverkapselung einzurichten. Dabei ist die Herstellung der Schichten nur ein Teil der Modulproduktion; der dauerhafte Schutz der aktiven Dünnschichten vor der umgebenden Witterung ist der zweite. Der Weg zur Lösung dieser F&E-Aufgaben wird nicht immer geradlinig sein: Es bedarf einiger Zeit, ein neues Material industriell anzuwenden. Doch die CIS-Technologie birgt die große Chance, Photovoltaik wirtschaftlicher zu machen. Das Unternehmen Sulfurcell und seine Partner sind daher den entscheidenden Schritt in Richtung Anwendung gegangen. 2006 sollen die erste CIS-Module am Markt angeboten werden.

[1] J. Klaer et al., Thin Solid Films 2003, 431-432, 534-537.

[2] Ch. Butz, PV 2002 – Markt, Akteure und Prognosen, Bank Sarasin, Basel, 2002.



**Bild 1:** Aufbau einer CIS-Dünnschicht-Solarzelle. Die Umwandlung eines Photons in elektrischen Strom in ihren Schichten ist in den drei Zeitschritten Generation, Trennung und Sammlung angedeutet.

**Bild 2:** Herstellungsprozess für CIS-Dünnschicht-Solarmodule.

