

Die PERFEKTE ZELLE

Neue Fotovoltaikmodule arbeiten effektiver als gängige oder benötigen weniger teures Silizium bei gleichem Wirkungsgrad. Kommt bald die Solarwende?

Von Sascha Rentzing

Auch wenn Rezession und Bankenkrise derzeit unsere Hauptsorgen zu sein scheinen, gibt es mittel- und langfristig größere Probleme: Der Verbrauch von Öl, Gas und Kohle steigt weiter, und damit nimmt auch die Erderwärmung zu. Würden alle fossilen Energieresourcen verbrannt, dürfte der Temperaturanstieg Teile der Erde unbewohnbar machen – so lauten Schätzungen des Klimarats der Vereinten Nationen. Sogar die Internationale Energieagentur, die bislang als enger Verbündeter der Kraftwerksbetreiber galt, fordert daher in ihrem letzten World Energy Outlook (2008) eine »globale Energierevolution«.

Die Solarindustrie will dabei laut Anton Milner, Vorstand des Europäischen Fotovoltaikindustrie-Verbands EPIA, eine Vorreiterrolle einnehmen: Sonnenkraftwerke mit 350 Gigawatt Gesamtleistung sollen bis 2020 jährlich gut 420 Terawattstunden beziehungsweise zwölf Prozent des in Europa benötigten Stroms liefern. Kein bescheidenes Ziel, steuern Solaranlagen doch EU-weit ebenso wie

global betrachtet aktuell nicht einmal ein Prozent zur Stromversorgung bei, und das auch nur, weil Regierungen die teure Technik fördern. Aber spätestens 2015 soll sich, so die Vorstellung der EPIA, Sonnenenergie dank sinkender Erzeugungskosten auch in sonnenärmeren Ländern rechnen. In Deutschland läge diese Latte bei etwa 20 Cent pro Kilowattstunde, aktuell kostet der Solarstrom hier zu Lande noch das Doppelte. Allerdings hält das Erneuerbare-Energien-Gesetz den Preis künstlich hoch, um der Branche durch das lukrative Einspeisen des Ökostroms ins Netz einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen.

Doch vielleicht wird das in absehbarer Zeit nicht mehr erforderlich sein. Denn auf der einen Seite fällt dank steigender Produktionszahlen und effizienterer Herstellungsverfahren der Preis für kristallines Silizium, dem Standardhalbleiter für die Stromgewinnung aus Licht (Kasten S. 87); auf der anderen arbeiten die Zellen immer effektiver, was den Materialeinsatz reduziert. Jeder Prozentpunkt Wirkungsgrad senkt, so eine Faustregel, die Kosten um fünf bis sieben Prozent, da pro Watt Leistung weniger Zell- beziehungsweise Modulfläche benötigt wird. »Derzeit erreichen Siliziumsolarzellen eine Effizienz von durchschnittlich 16,5 Prozent – dieser Wert kann sicher auf deutlich über 20 Prozent wachsen«, bekräftigt Eicke Weber, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg.

Zu den neuesten Errungenschaften zählt eine Umorganisation der elektrischen Anschlüsse, die so genannte Rückkontaktzelle. Elektronen, die durch das einfallende Licht im Halbleiter generiert werden, müssen Metallkontakte erreichen und von dort abgeleitet werden. Eine mit Phosphor angereicherte und für Elektronen gut leitende »Emitterschicht« hat deshalb die Aufgabe, frei gewordene Ladungsträger zu sammeln und dorthin weiterzureichen. Weil diese unterwegs abgefangen werden können, befinden sich Kontakte und Emitter meist auf der

Lichtaktive dünne Schichten aus halbleitenden Verbindungen an Stelle des Siliziums gehören zu den Hoffnungsträgern der Solarindustrie. In Laseranlagen wie dieser werden die aufgedampften Schichten strukturiert.



OERLIKON SOLAR



CONCENTRIX SOLAR

vom Licht beschienenen Zellvorderseite. Die elektrischen Anschlüsse werfen aber Schatten und verringern so die Ausbeute. Einige Unternehmen haben deshalb die Emitterschicht samt Kontakten auf die Rückseite verbannt. Die amerikanische Firma Sunpower erreicht allein dadurch bereits 22 Prozent Wirkungsgrad – das ist Weltrekord für eine in Serie gefertigte Zelle. Die niedersächsische Firma Stiebel Eltron plant ebenfalls die Produktion einer vom Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH) entwickelten Rückkontaktzelle mit mehr als 20 Prozent Wirkungsgrad.

Laser für die Lichtfänger

Für diese Technik ist aber monokristallines Silizium großer Reinheit nötig, denn an Unregelmäßigkeiten in der Kristallstruktur gehen vom Licht erzeugte Ladungsträger verloren. Doch solches Material erfordert einen komplizierten und langwierigen Herstellungsprozess und ist dementsprechend teuer. Problematisch ist bei der Rückseitenkontaktierung auch, dass nun die elektrischen Anschlüsse beider Pole ineinander verschachtelt werden müssen, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Deshalb sind weitere Prozess- und Justierschritte erforderlich. Sunpower hat den optimalen Prozess für seine Zellen offensichtlich noch nicht gefunden: Nach Schätzungen lagen die Herstellungskosten im vergangenen Jahr bei

etwa 50 Cent pro Watt Leistung, während die Konkurrenz im Mittel für 32 Cent fertigt.

Stiebel Eltron will kosteneffizienter sein. Das kooperierende ISFH hat nach Angaben von Jan Schmidt, Gruppenleiter Fotovoltaikmaterialien, dafür einen Trick gefunden. Statt die elektrischen Kontakte mittels Pasten aufzudrucken, arbeitet zunächst ein Laser Höhenunterschiede in den Halbleiter, darauf scheiden sich die Leitungsbahnen aus einer Dampfphase ab. Weil dabei kein mechanischer Druck ausgeübt wird, lassen sich dünnere und damit preiswertere Wafer verwenden.

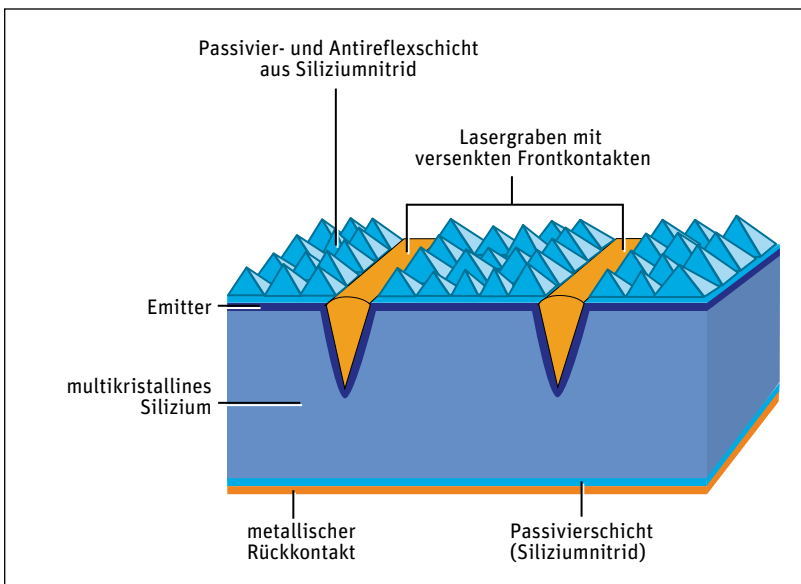
Multikristallines Silizium ist um bis zu 30 Prozent billiger. Deshalb haben das ISFH und das ISE die so genannte EWT-Zelle (*Emitter-Wrap-Through*) entwickelt. Ein Laser bohrt Tausende von Löchern in den Halbleiter, die mit Emittiermaterial gefüllt werden. Weil nun überall die Sammelschicht in den Kristall ragt, müssen die freigesetzten Ladungsträger kürzere Wegstrecken zurücklegen – das kompensiert den Effekt der nicht einheitlichen Kristallstruktur.

Der zusätzliche Prozessschritt erhöht natürlich die Fertigungskosten, die Stromausbeute beträgt aber schon 18 Prozent. Industriepartner Q-Cells aus Thalheim will diesen Aufbau serienreif machen. Zum Vergleich: Q-Cells' multikristalline Zellen mit Standardaufbau kommen zurzeit auf 14,1 Prozent Wirkungsgrad.

Konzentratorzellen fokussieren Licht mit wenige Zentimeter großen Linsen nahezu 500-fach verstärkt auf leistungsstarke Solarzellen. So genannte Tracker (unten) führen die Module mechanisch der Sonne nach.

CONCENTRIX SOLAR





Drei Tricks, um die Effizienz der Lichtumwandlung zu steigern, vereint diese Zelle: Pyramidale Strukturen der Oberfläche verringern Reflexionen, Kontakte auf der Rückseite Abschnürungen. Damit die Ladungsträger rasch zum Emitter wandern können, wurde die gut leitende Emitterschicht über lasergebohrte Gräben in den Kristall eingelassen.

Doch nicht nur durch Verbannung der Kontakte auf die Rückseite lassen sich höhere Ausbeuten erreichen. Der japanische Konzern Sanyo kombiniert kristallines Silizium mit Dünnschichttechnik: Er bringt auf beiden Seiten eines hochreinen, nur 0,2 Millimeter dicken monokristallinen Wafers amorphes Silizium auf. Auf der Front dient es als Emitter, auf der Rückseite als Passivierschicht: Sie wirkt für Elektronen als Barriere, während deren Gegenstücke, die positiven Defektelektronen, ungehindert zu den Elektroden abfließen und somit nicht mehr rekombinieren können. Mit dieser Materialkombination erreicht Sanyo in der Serienproduktion 20 Prozent, im Labor sogar 22 Prozent Wirkungsgrad mit 0,085 Millimeter dicken Wafers, was Kostensenkungen erwarten lässt.

Eine weitere Methode, Solartechnik preiswerter zu machen, bietet der Ersatz des Siliziumkristalls durch 100-mal dünnere fotoaktive Schichten aus Cadmium-Tellurid (CdTe) oder CIS (die Abkürzung steht für halbleitende Verbindungen aus Kupfer, Indium und Gallium sowie Selen oder Schwefel). Statt Siliziumblöcke zu züchten, in Scheiben zu sägen und

diese in vielen Schritten zu Zellen zu verarbeiten, dampfen die Produzenten von Dünnschichtmodulen die Lichtfänger zwei Nanometer dick auf Glas oder Folie auf. Marktführer ist die amerikanische Firma First Solar, deren CdTe-Module in der Fertigung nach eigenen Angaben 93 US-Cent, also rund 68 Cent pro Watt Leistung kosten (Stand: Juli 2009). Damit liegt das Unternehmen weit unter den heute durchschnittlichen Produktionskosten für Solarmodule von rund zwei Euro pro Watt Leistung.

Die einfachere Fertigung erkaufen sich die Hersteller mit einem sehr viel geringeren Wirkungsgrad von durchschnittlich nur 10,8 Prozent. Um die gleiche Strommenge zu erzeugen wie kristalline Module, benötigen sie daher größere Flächen. Deren teurere Installation kompensiert die geringeren Produktionskosten teilweise. Durch bessere Absorberschichten will First Solar den Wirkungsgrad seiner Module aber bis 2012 auf zwölf Prozent erhöhen, gleichzeitig die Fertigung optimieren und so den Modulpreis auf 50 Cent pro Watt Leistung senken. Die Aussicht auf derart preiswerte Solartechnik verleitet Wissenschaftler zu kühnen Visionen: Laut dem Solar Grand Plan, einer strategischen Zukunftsstudie amerikanischer Forscher zur Deckung des Strombedarfs der USA aus Sonnenkraftwerken, sollen 2050 CdTe-Module mit 3000 Gigawatt Leistung vier Fünftel des in den Vereinigten Staaten benötigten Stroms liefern (Spektrum der Wissenschaft 3/2008, S. 60).

Einen Mittelweg bieten Module, die als fotoaktive Schicht amorphes Silizium nutzen. Oerlikon Solar, ein Schweizer Hersteller von Produktionsmaschinen für diese Technik, verspricht, dass die in seinen Anlagen fabrizierten Zellen bis 2010 in den meisten Regionen der Welt Solarstrom zu den gleichen Kosten wie von konventionellem Netzstrom liefern werden. Dafür sollen die Fertigungskosten auf 44 Cent pro Watt halbiert werden. Der preiswerten Herstellung steht allerdings auch hier ein niedriger Wirkungsgrad der Module von

DIE KONKURRENTEN AUF EINEN BLICK

	kristallines Si	multikristallines Si	CdTe	CIS	mikro-Si/amorphes Si
von der Industrie erreichte Effizienz (in Prozent)	19,6	18,5	11,1	12	9
erreichbare Effizienz (in Prozent)	> 20	< 20	18	18	15
Herstellungskosten (in €/Wh)	2	1,5 – 2	0,68	2	1
erwartete Herstellungskosten (€/Wh)	< 0,5	< 0,5	< 0,3	< 0,3	< 0,3

nur sieben Prozent gegenüber. Amorphes Silizium scheidet sich, wie der Name schon sagt, in einer ungeordneten Struktur ab. Zahlreiche aufgebrochene Siliziumverbindungen fangen Elektronen ab. Mit Hilfe einer zusätzlich aufgedampften Schicht aus mikrokristallinem Silizium hat Oerlikon den Wirkungsgrad auf 9,3 Prozent verbessert. Mikrokristallines Silizium besteht aus vielen kleinen Siliziumkristallen, die Licht vor allem im infraroten Bereich absorbieren. Da die amorphe Schicht den sichtbaren Teil des Spektrums nutzt, beutet das Tandem Sonnenenergie insgesamt besser aus.

Das größte Potenzial aller Dünnschichttechniken wird jedoch CIS-Modulen zugesprochen: Das National Renewable Energy Laboratory der USA erreichte damit einen Wirkungsgrad von 20,3 Prozent – keine andere Dünnschichttechnik kann da bislang mithalten. Allerdings sind industriell gefertigte Paneele noch weit von diesem Wert entfernt, und bei den Produktionskosten hat sich die Technik noch nicht von der konventionellen Konkurrenz abgesetzt: 30 Cent pro Watt Leistung gelten als erreichbar, derzeit liegen die Kosten aber noch bei rund zwei Euro. Stärker automatisierte Prozesse und eine größere Produktionsmenge sollen die Kosten deutlich senken. So erforscht das Stuttgarter Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) wirtschaftlichere Verfahren zur Halbleiterabscheidung, dem teuersten Herstellungsschritt.

Viel versprechende Fokussierung

Vor allem in südlichen Ländern mit ihrer viel direkteren Sonneneinstrahlung könnten so genannte Konzentratorsysteme den beschriebenen Techniken Marktanteile streitig machen. Darin fokussieren in die Module integrierte Spiegel oder Linsen das Licht auf die eigentlichen Zellen. Dank dieses Tricks genügen sehr kleine Abmessungen, das spart Halbleitermaterial – meist kommen Elemente der dritten und fünften Gruppe des Periodensystems wie Gallium, Indium, Phosphor und Arsen zum Einsatz –, und das wiederum senkt die Kosten. Die effizientesten Stapelzellen erreichen mehr als 40 Prozent Wirkungsgrad, Verluste bei der Verschaltung zu einem Modul senken die Effizienz auf 25 bis 30 Prozent. Doch selbst damit arbeitet solch ein Konzentrador immer noch effizienter als andere derzeit gängige Solarmodule.

Allerdings ist die Produktion schwierig, denn Linsen und Zellen müssen auf wenige Millimeter genau zueinander ausgerichtet sein. Präzision ist später auch beim Kraftwerksbetrieb gefragt. Die Linsen bündeln das Licht nur bei senkrechtem Lichteinfall und werden

DIE LICHTWANDLER

Die Energiegewinnung mit Solarzellen beruht auf dem photovoltaischen Effekt, den so genannte Halbleiter bei Lichteinfall zeigen: Weil in diesen Kristallen Elektronen vorkommen, die nur schwach in den Atomen des Halbleiters gebunden sind, genügt die eingestrahlte Energie, um sie zu lösen und als elektrischen Strom verfügbar zu machen. Durch den Einbau von Fremdatomen in einem Gitter (fachlich: Dotierung) wird dies noch unterstützt.

Meist dient einkristallines Silizium, zu etwa 0,2 Millimeter dicken »Wafeln« geschnitten, als Ausgangsmaterial. Die freigesetzten Elektronen gelangen über

eine mit Phosphor dotierte, negativ leitende Schicht, den so genannten Emitter, zur Oberfläche; an der mit Bor dotierten Unterseite entsteht eine positive Ladungszone. Über ein feines Netz von Kontakten auf der Front (Minuspol) und einen großflächigen Kontakt auf der Rückseite (Pluspol) wird der Strom abgeführt.



Jedes Fotovoltaikmodul besteht aus einem Raster von Zellen.

deshalb auf »Trackern« montiert, die sie der Sonne nachführen. Die deutsche Firma Concentrix Solar, die aus dem ISE hervorgegangen ist und weltweit als einzige solche Anlagen bereits serienmäßig fertigt, hat in Spanien schon 100 Systeme mit 600 Kilowatt Gesamtleistung ans Netz gebracht. Die Freiburger rechnen allerdings mit starker Konkurrenz. Weltweit arbeitet über ein Dutzend Unternehmen an Licht bündelnden Systemen, manche, wie die kanadische Firma Morgan Solar, nutzen dazu preiswertes Acryl.

Im Rennen um den Platz an der Sonne liegen damit viele verschiedene Solartechniken in aussichtsreicher Position. Welche am ehesten mit fossilen Energien konkurrieren und Strom für fünf bis zehn Cent pro Watt herstellen kann, ist derzeit nicht absehbar, denn alle weisen noch hohes Kostensenkungspotenzial auf. Dünnschichttechniken verbilligen die Fertigung, Siliziummodule und Konzentrator-Kraftwerke versprechen Preisvorteile durch steigende Wirkungsgrade. Hält die Branche das Wachstums- und Innovations-tempo der vergangenen Jahre, wird Solarstrom schon 2015 in vielen Regionen der Erde zu gleichen Preisen wie konventionell erzeugter Netzstrom angeboten werden können und einige Jahre später konkurrenzlos günstig erzeugt werden können. ◀



Sascha Rentzing studierte Publizistik an der Universität Münster. Er arbeitet als Technikjournalist in Dortmund.

Sellmann, T.: Photovoltaik: Strom ohne Ende. Solarpraxis, Berlin 2009.

Witzel, W., Seifried, D.: Das Solarbuch: Fakten und Strategien für den Klimaschutz. Ökobuch, Staufen, 3. Auflage 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/999557.