



## Strom erzeugende Fenster

Bislang dominieren auf dem Dach aufgeständerte Solarmodule den Markt. Doch Dünnschichtmodule eröffnen neue Anwendungsmöglichkeiten. Dank ihrer Flexibilität und des geringen Gewichts lassen sie sich gut in die Gebäudehülle, etwa in Fenster oder Fassaden, integrieren. Einige Firmen haben bereits sogenannte BIPV (Building Integrated Photovoltaics)-Lösungen parat: Centrosolar bietet Module an, welche die herkömmliche Dachhaut ersetzen können. Schott und Schüco verkaufen Panels, die aufgebaut sind wie Doppelglasfenster: Die Hersteller integrieren eine hauchdünne photoaktive Schicht zwischen zwei Glasscheiben. Je nach Kundenwunsch ist diese Schicht transparent, halbdurchsichtig oder undurchsichtig. Wer ästhetische Akzente setzen will, ist bei der BIPV gut aufgehoben, dafür ist die klassische Photovoltaik – noch – wirtschaftlicher. Weil Fassaden- und Fenstermodule keiner direkten Strahlung ausgesetzt sind, arbeiten sie weniger effizient. Zudem sind sie im Gegensatz zu marktüblichen Modulen kein Massenprodukt und daher in der Regel teurer.



# Die Schlankheitswelle

**Modultechnik** | Die Dünnschichthersteller wollen ihre Produktion bis 2012 auf fünf Gigawatt verfünffachen. Massenproduktion und moderne Fertigungslinien sollen massiv Kosten senken. Ähnlich gehen auch die Vertreter klassischer Siliziumtechniken vor. Das Rennen um das erfolgreichste Solarkonzept ist im vollen Gang.

Im Wettlauf um die effizienteste Dünnschichtszelle der Welt liegt das National Renewable Energy Laboratory (NREL) der USA vorn: Es erreichte mit einem Lichtsammler aus Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) einen Laborwirkungsgrad von 20,3 Prozent. Damit stoßen kupferbasierte Dünnschichtzellen, vereinfacht mit CIS abgekürzt, in Effizienzbereichen der gängigen kristallinen Photovoltaik (PV) vor: Zellen aus multikristallinem Silizium, die heute den größten Marktanteil haben, kommen auf Wirkungsgrade von 20,3 Prozent, schneiden im Labor also nur etwas besser ab als ihre schlanken Konkurrenten.

In der Praxis bleibt die CIS-Technik aber noch hinter ihren Möglichkeiten: Industriell hergestellte Module aus diesem Halb-

leitermaterial wandeln nur elf Prozent des Sonnenlichts in Elektrizität um, multikristalline Module dagegen bis zu 14 Prozent, monokristalline sogar bis zu 17,5 Prozent. Diesen Effizienz-Rückstand können CIS-Module bislang nicht durch günstigere Fertigungskosten ausgleichen: Sie sind in der Produktion mit mehr als zwei Euro pro Watt genauso teuer wie die dickschichtige Silizium-Konkurrenz. Das wichtigste Ziel setzt CIS also noch nicht um: die PV-Herstellkosten so weit zu senken, dass Solarstrom konkurrenzfähig zu Netzstrom ist.

Die anderen Dünnschichttechniken können das bislang ebenso wenig. Module aus Dünnschichtsilizium zum Beispiel können laut Experten theoretisch mehr als 15 Prozent Wirkungsgrad erreichen und für weniger als 30

Eurocent pro Watt hergestellt werden. Damit würden sie jede verfügbare Solartechnik in den Schatten stellen. Derzeit ist die Technik jedoch nur halb so effizient und in der Fertigung derzeit mindestens drei Mal teurer.

### Potenziale ungenutzt

Doch CIS Dünnschichtsilizium und Co stehen vor einem großen Entwicklungsschritt. Nach einer Marktanalyse der Schweizer Bank Sarasin wollen die Dünnschichthersteller ihre Produktion 2009 auf zwei Gigawatt (GW) verdoppeln, bis 2012 sogar mehr als verfünffachen – trotz Finanzkrise und den damit verbundenen Problemen einiger Firmen, Wachstumskapital zu beschaffen. „Die Dünnschicht erhöht deutlich ihren Marktanteil“, sagt Sarasin-Ana-

lyst Matthias Fawer. Gleichzeitig automatisieren die Hersteller ihre Produktion und steigern so den Durchsatz. Massenfertigung und bessere Herstellertechniken sorgen für fallende Kosten. Das, so die Hoffnung, wird den schlanken Stromgeneratoren endgültig zum Durchbruch verhelfen.

Der Markterfolg des US-Herstellers von Modulen aus Cadmiumtellurid (CdTe) First Solar nährt das Selbstbewusstsein der Branche. Die Amerikaner fertigen nach eigenen Angaben inzwischen für rund 70 Eurocent pro Watt – keine andere Firma produziert so günstig. Nachteil der CdTe-Module ist allerdings, dass sie derzeit nur elf Prozent Wirkungsgrad erreichen. Daher benötigen sie mehr Fläche, um die gleiche Strommenge zu erzeugen wie kristalline Module. Die höheren Installationskosten zehren den Produktionskostenvorteil teilweise wieder auf.

Dennoch gilt der Erfolg von First Solar als Meilenstein auf dem Weg zur Wettbewerbsfähigkeit des Solarstroms. Experten hatten die Netzparität in Deutschland frühestens für 2015 erwartet. Von da an wäre Sonnenenergie nicht mehr teurer als herkömmlicher Strom aus der Steckdose. Der jüngste Fortschritt lasse diese Netzparität nun in greifbare Nähe rücken,

sagt Holger Krawinkel, Energieexperte beim Verbraucherzentrale Bundesverband. „First Solar-Module könnten bereits Strom für umgerechnet 20 bis 25 Eurocent pro Kilowattstunde produzieren“, so der Experte. Der aktuelle Strompreis liegt in Deutschland bei rund 20 Eurocent.

First Solar setzt bei den Kosten Maßstäbe. Welche Dünnschichtfirma es nicht schafft, mindestens ebenso günstig zu produzieren, oder mit höheren Wirkungsgraden die Systemkosten zu senken, wird es schwer haben, sich im Markt durchzusetzen. Entsprechend ehrgeizig ist die Konkurrenz: Neben First Solar hat auch die US-Firma Abound Solar umgerechnet mehr als 100 Millionen Euro in eine vollautomatisierte Fabrik investiert, die noch in diesem Frühjahr die Fertigung von CdTe-Modulen aufnehmen soll. Abound Solar will schon bald ebenfalls Kosten von unter einem Dollar pro Watt erreichen.

Das ist auch das Ziel der Berliner Firma Inventux. Sie produziert seit Ende 2008 Module aus sogenanntem mikromorphen Silizium. Die Technik ist eine Weiterentwicklung marktgängiger Dünnschichtpaneele aus einfachem amorphem Silizium. Mithilfe eines zusätzlichen Absorbers aus mikrokristallinem Silizium, der auf die amorphe Schicht aufgedampft wird, hat Inventux die Stromausbeute auf mehr als acht Prozent verbessert. Die Kostenersparnis sollen vor allem Skaleneffekte durch eine größere Produktionsmenge bringen. Die Firma will die Kapazität ihres Berliner



Die Dünnschicht hat das Potenzial für ähnlich hohe Wirkungsgrade wie kristalline Siliziummodule. Dafür werden diese langfristig ebenso günstig zu produzieren sein wie ihre schlanken Konkurrenten. Noch hinkt die Dünnschicht der kristallinen Technik aber hinterher: Ihre Effizienzen sind deutlich niedriger, und bei den Kosten können sich bisher nur CdTe-Module klar absetzen.

Werks innerhalb der kommenden zwei Jahre auf über 60 Megawatt mehr als verdoppeln.

### Effizientere Maschinen

Noch ehrgeiziger sind die Pläne der US-Firma Nanosolar. Sie hat einen Herstellprozess entwickelt, bei dem winzige Nanopartikel aus Kupfer, Indium, Gallium, Selen und eventuell Schwefel im Rolle-zu-Rolle-Verfahren auf eine Folie gedruckt werden. Auf weniger als 30 Eurocent wollen die Amerikaner mit ihrer innovativen Drucktechnik die Kosten drücken – auf rund ein Drittel der Modulkosten von Branchenprimus First Solar. „Wir können große Flächen in sehr kurzen Taktzeiten beschichten“, erklärt Nanosolar-Sprecher Erik Oldekop. Die Fabriken stehen bereits, der Start der Serienfertigung naht. In einem 430-MW-Werk in San Jose, Kalifornien, will Nanosolar die Zellen herstellen und diese dann in Lückenwalde bei Berlin zu Modulen verschalten. Nicht nur die Modulproduzenten, sondern auch die Anbieter von Maschinen für

die Dünnschichtproduktion arbeiten eifrig an Innovationen. Der Schweizer Anlagenbauer Oerlikon Solar verspricht, dass die auf seinen Linien hergestellten Module aus Dünnschichtsilizium bis 2010 Strom konkurrenzfähig zu Netzstrom erzeugen werden. „Wir wollen die Produktionskosten auf 44 Eurocent pro Watt halbieren“, sagt Oerlikon Solar-Chefin Jeannine Sargent.

Im Dünnschichtsektor stehen die Zeichen also klar auf Wachstum. Wie viele Hersteller ihre ambitionierten Ausbau- und Produktionsziele im zeitlich vorgegebenen Rahmen erreichen, ist aber offen. Verzögerungen sind keine Seltenheit: Der Gang vom Labor zur Fertigung dauert oft Jahre, und je mehr Halbleitermaterialien zum Einsatz kommen, desto schwieriger wird es, einen

stabilen Produktionsprozess einzusetzen. First Solar zum Beispiel hat für die Kommerzialisierung seiner Module genau ein Jahrzehnt gebraucht. CIS-Hersteller Würth Solar optimierte seine Technik sieben Jahre in einer Pilotlinie, bevor er 2007 mit der Serienfertigung beginnen konnte. Gerade beim CIS wartet offenbar noch viel Entwicklungsarbeit. „Im Gegensatz zu den anderen Dünnschichttechniken werden CIS-Module noch auf prototypischen Anlagen hergestellt“, erklärt Michael Powalla, Leiter des Geschäftsbereichs Photovoltaik im Stuttgarter Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW).

Viel Zeit, um Serienreife Produkte zu präsentieren, haben die Dünnschichtfirmen allerdings nicht. Auch im kristallinen PV-Segment entwickeln sich Innovationen rasch, Wirkungsgrade steigen, Herstellkosten fallen. Nicht wenige Forscher glauben deshalb, dass trotz des großen Entwicklungspotenzials der Dünnschicht an der konventionellen Solartechnik künftig kaum ein Weg vorbeiführen wird. „Kristalline Siliziumzellen werden auch in Zukunft eine dominierende Rolle spielen“, sagt Stefan Glunz, Leiter der Abteilung Entwicklung und Charakterisierung von Siliziumzellen am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg. Denn einerseits



Werkfotos

konventionelles Silizium liegt dagegen bei mehr als 100 Euro pro Kilogramm. Demnach ist es gut vorstellbar, dass bald auch die klassische PV Niedrigpreisprodukte auf dem Markt anbieten und die Dünnschicht damit unter erheblichen Zugzwang setzen wird.

### Mehr als eine Nische

Die Dünnschichtfirmen werden also wahrscheinlich hart um Marktanteile kämpfen müssen. Vorerst dürfte es ihre Technik wegen der niedrigen Effizienzen vor allem dort schwer haben, wo viel Leistung auf wenig Fläche erbracht werden muss. Hausbesitzer in Ländern mit attraktiver Solarförderung zum Beispiel werden ihr Dach eher mit kristallinen Siliziumpaneelen bestücken, weil diese auf zehn Quadratmetern schlicht mehr Strom erzeugen und eine Einspeisevergütung erwirtschaften, mit der sich der Preisnachteil gegenüber der Dünnschicht mehr als aufwiegen lässt. Kurzfristige Chancen bieten sich den schlanken Lichtsammlern dagegen auf großen Industrie- und Gewerbedächern oder im Freiland: Hier geht es weniger darum, auf einer begrenzten Fläche maximale Leistung zu generieren, denn Platz ist reichlich vorhanden.

Gelingt es Firmen wie First Solar oder Oerlikon, die Fertigungskosten für Dünnschichtmodule in zwei Jahren tatsächlich so weit zu senken, dass sie Solarstrom zu den gleichen Kosten wie Netzstrom liefern, dürfte an der Technik kein Weg mehr vorbeiführen. Denn ist PV-Strom preislich erst einmal auf Augenhöhe mit dem Strom aus der Steckdose, wird sich niemand mehr über die Abnahme Sorgen machen müssen. Die kristalline Technik wäre damit ausgestochen: Für weniger als 50 Eurocent wird sich in absehbarer Zeit wohl kein kristallines Modul fertigen lassen. Theoretisch kann die Dünnschicht also viel bewegen, nun muss sie aber erst einmal den anstehenden Kapazitätsausbau bewältigen.

Sascha Rentzing

stehe die Langzeitstabilität dieser Module außer Frage und andererseits könnten dank der konsequenten Weiterentwicklung von Siliziumzellen die Stromgestehungskosten gesenkt werden, so Glunz.

### Kristalline Konkurrenz

So herrscht auf der oberen Wirkungsgradskala ein reger Wettstreit um die besten Konzepte: Einige von ihnen, zum Beispiel Rückkontaktzellen, stehen vor der breiten Markteinführung. Bei diesem Typ Lichtsammler befinden sich die Stromanschlüsse auf der Rückseite, sodass die Front nicht von Kontakten verschattet wird. So steigt die Effizienz. Gleichzeitig benötigt die neue Technik weniger Rohstoff. Da die Rückseite berührungslos mit Lasern hergestellt und nicht mehr mit Siebdruck gearbeitet wird, können dünnere Siliziumscheiben zu Zellen verarbeitet werden, was Kosten spart.

Bei einem Durchbruch von sogenanntem direkt gereinigtem metallurgischen Silizium, eines neuartigen Halbleitermaterials, könnten die Produktionskosten kristalliner Siliziumzellen noch weiter sinken. Der neue Sonnenstoff ist deutlich günstiger als das üblicherweise verwendete Halbleitersilizium, verspricht aber ähnlich hohe Effizienzen: Nach Angaben von Fraunhofer ISE-Leiter Eicke Weber kann das Material für drei bis sechs Euro produziert und selbst für zehn bis 13 Euro pro Kilogramm noch gewinnbringend verkauft werden. Der derzeitige Spotmarktpreis für

### Effizienz- und Kostenpotenzial der Solartechnologien

	c-Si	mc-Si	CdTe	CIS	a-Si	a-Si/ $\mu\text{c-Si}$
erreichbare Effizienz (Modul)	<20	<18	18	16-18	9	15
erreichte Effizienz (Modul)	19,3	16,1	11,1	11	6,0	9,5
Herstellkosten in Euro pro Watt	>2,5	>2	0,74	>2	0,9	0,87
erwartet für 2013-2020	1,50	1	0,6	0,8	<0,9	0,5
erwartet ab 2020	<0,5	<0,5	<0,3	<0,4	-	<0,3

c-Si = monokristallines Silizium, mc-Si = mikrokristallines Silizium, CdTe = Cadmiumtellurid, CIS = Kupfer-Indium-Diselenid (CIS wird auch als Oberbegriff für andere auf Kupfer basierenden Halbleiterverbindungen verwendet), a-Si = amorphes Silizium, a-Si/ $\mu\text{c-Si}$  = mikromorphes Silizium  
 Quellen: EU PV Platform, eigene Recherchen