

Dünnschicht-Photovoltaik vor dem Durchbruch: kristalline Siliziumzellen weiterhin dominierend

Die Hersteller von Dünnschicht-Solarmodulen senken ihre Kosten und gewinnen Wettbewerbskraft. Leicht werden sich die klassischen kristallinen Siliziumtechniken aber nicht vom Markt verdrängen lassen. Denn auch sie haben noch großes Entwicklungspotenzial. Das Rennen um die erfolgreichste Photovoltaik-Technologie ist in vollem Gange.



Links: Teststreifen mit 15 CIS-Solarzellen des ZSW und Rekordzelle in der Mitte. Rechts: Ein Mitarbeiter des Berliner Unternehmens Inventux nimmt die Oberfläche eines Moduls aus Dünnschicht-Silizium in Augenschein. (Quellen: ZSW; Inventux)

CIS-Solarzellen erreichen in der vorindustriellen Produktion bereits Wirkungsgrade von rund 20 %

Im Wettlauf um die effizienteste Dünnschicht-Solarzelle schließt das Stuttgarter Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) zur Weltspitze auf. Es erreichte mit Zellen auf Basis von Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIS) in einer vorindustriellen Fertigungslinie 19,6 Prozent Wirkungsgrad. Damit liegen die Stuttgarter Forscher nur noch knapp hinter dem amerikanischen National Renewable Energy Laboratory (NREL), das im gleichen Umfeld auf 19,9 Prozent Wirkungsgrad kommt. "Als nächstes wollen wir die 20-Prozent-Hürde nehmen", kündigt Michael Powalla, Leiter des Geschäftsbereichs Photovoltaik im ZSW, selbstbewusst an. Damit würde CIS in Effizienzbereiche der gängigen kristallinen Photovoltaik vordringen: Zellen aus multikristallinem Silizium, die heute den größten Marktanteil haben, erreichen Laborwirkungsgrade von 20,3 Prozent, arbeiten also kaum effizienter als ihre schlanken Konkurrenten.

Als "Solar-Report" veröffentlicht der Solarserver im August 2009 einen Gastbeitrag der neuen Fachmesse für solare Produktionstechnik "solarpeq", die parallel zur Weltleitmesse "glasstec" in Düsseldorf stattfinden wird. Vom 28.09. - 01.10.2010 will die "solarpeq" ein internationales Forum für alle bieten, die Maschinen zur Herstellung und Verarbeitung von Silizium, Wafern, Solarzellen und -modulen anbieten oder kaufen wollen. Zur Erstveranstaltung werden über 250 Aussteller aus über 30 Ländern ihre Produkte vorstellen, insgesamt werden zu solarpeq und glasstec über 55.000 Fachbesucher erwartet.



Sensibles Gut: Nach der Halbleiterbeschichtung werden Dünnschichtmodule behutsam zwischengelagert.
Foto: Oerlikon Solar

Konkurrenzlos billiger Solarstrom als Ziel

In der Praxis bleibt die CIS-Technik aber noch hinter ihren Möglichkeiten: Industriell hergestellte Module aus diesem Halbleiter wandeln gegenwärtig maximal zwölf Prozent des Sonnenlichts in Solarstrom um, multikristalline Module hingegen 18,5 Prozent, monokristalline Module kommen sogar auf bis zu 20 Prozent. Ihren Effizienz-Rückstand können CIS-Module bislang nicht durch günstigere Fertigungskosten ausgleichen: Pro Watt liegen sie in der Herstellung bei mehr als zwei Euro - auf dem gleichen Niveau wie Siliziummodule, für die viel mehr Halbleitermaterial nötig ist. Vom wichtigsten Ziel ist CIS somit noch weit entfernt: konkurrenzlos billig Strom zu produzieren.

Andere Dünnschichttechniken sind dazu bislang ebenso wenig imstande. Module aus Dünnschichtsilizium zum Beispiel könnten, so sagen Experten, mehr als 15 Prozent Wirkungsgrad erreichen und für weniger als 0,30 Euro pro Watt hergestellt werden. Damit würden sie jede aktuell verfügbare Solartechnik in den Schatten stellen. Noch kommen sie aber nur auf Wirkungsgrade von rund neun Prozent und sind in der Herstellung drei Mal teurer.

Doppelter Marktanteil 2010

Doch CIS, Dünnschichtsilizium und Co stehen vor einem großen Entwicklungsschritt. "Fast 200 Firmen produzieren derzeit Dünnschichtmodule oder arbeiten daran", sagt Arnulf Jäger-Waldau, Energieexperte der EU-Kommission. Der europäische Photovoltaikindustrie-Verband (EPIA) erwartet daher, dass sich die Fertigungskapazität für die Technik bis 2010 auf mehr als vier Gigawatt verdoppeln könnte - das entspräche einem Marktanteil von rund 20 Prozent. Gleichzeitig wird die Fertigung dank neuer Herstelltechniken und Automatisierungslösungen immer effizienter. Massenfertigung und der technische Fortschritt senken die Kosten - und erhöhen die Marktchancen. Viele der produktionstechnischen Innovationen werden auf der solarpeq in Düsseldorf zu sehen sein.

Meilenstein auf dem Weg zur Wettbewerbsfähigkeit des Solarstroms

Der Erfolg des US-Herstellers von Modulen aus Cadmiumtellurid (CdTe) First Solar nährt das Selbstbewusstsein der Dünnschichtproduzenten. Die Amerikaner fertigen nach eigenen Angaben inzwischen für rund 0,93 Dollar, umgerechnet etwa 0,67 Euro pro Watt - kein anderes Unternehmen produziert so günstig. Ein Nachteil der CdTe-Module ist allerdings, dass sie derzeit nur maximal 11,1 Prozent Wirkungsgrad erreichen. Daher benötigen sie mehr Fläche, um die gleiche Strommenge zu erzeugen wie marktgängige Siliziummodule. Die höheren Installationskosten zehren den Produktionskostenvorteil teilweise wieder auf. Dennoch gilt First Solars Errungenschaft 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 e.V. "First Solar-Module könnten bereits Strom für umgerechnet 0,20 bis 0,25 Euro pro Kilowattstunde produzieren", so Krawinkel. Der aktuelle Strompreis liegt in Deutschland bei rund 0,20 Euro.



Dünnschicht für US-Dächer: Vor allem in Kalifornien entstehen derzeit überall Photovoltaik-Kraftwerke. Auf diesem Dach in Fontana werden zwei Megawatt First Solar-Module verbaut.

First Solar gibt den Takt vor

Bei den Kosten setzt First-Solar die Messlatte. Dünnschicht-Hersteller, die nicht bald ebenso günstig fertigen oder mit höheren Wirkungsgraden die Systemkosten drücken können, werden sich im Markt wohl nicht durchsetzen. Zumal auch die Hersteller der marktgängigen kristallinen Technik durch steigende Massenproduktion und technische Verbesserungen ihre Kosten kontinuierlich senken. Entsprechend ehrgeizig ist die Dünnschicht-Konkurrenz: Abound Solar aus Fort Collins (Colorado) startete erst im April 2009 die Produktion von CdTe-Modulen und will das Watt in seiner neuen 35 Megawatt (MW)-Linie noch in diesem Jahr für einen Dollar, also etwa 0,72 Euro produzieren. 2010 seien bei 200 MW Produktionskapazität bereits Kosten von 0,90 Dollar (rund 0,65 Euro) pro Watt angepeilt, sagt Gründer und Vorstandschef Pascal Noronha.

Anlagenbauer Oerlikon Solar und Applied Materials wollen Kosten halbieren

Schnell unter einen Dollar zu kommen, ist auch das Ziel des Berliner Unternehmens Inventux. Es produziert seit Ende 2008 Module aus so genanntem mikromorphem Silizium. Die Technik ist eine Weiterentwicklung marktgängiger Dünnschichtmodule aus einfachem amorphem Silizium. Mithilfe eines zusätzlichen Absorbers aus mikrokristallinem Silizium, der auf die amorphe Schicht aufgedampft wird, hat Inventux die Solarstromausbeute auf neun Prozent verbessert. Die angestrebte Kostenersparnis sollen Skaleneffekte durch eine größere Produktionsmenge und weitere Effizienzverbesserungen bringen. "2010 wollen wir zehn Prozent Wirkungsgrad erreichen", erklärt Inventux-Sprecher Thorsten Ronge. Dafür arbeitet Inventux an Prozessoptimierungen, profitiert aber auch von Innovationen des Ausrüsters Oerlikon Solar, von dem es seine Beschichtungsanlagen bezieht. Dessen Chefin, Jeannine Sargent, verspricht, dass Ende 2010 auf Oerlikon-Anlagen die neuartigen Tandemmodule für 0,70 Dollar (circa 0,50 Euro), also zu halben Kosten gefertigt werden können.



In der hoch automatisierten Dünnschichtproduktion spielen Roboter und integrierte Fertigungslinien eine zentrale Rolle. Fotos: Inventux; Applied Materials

Ähnliche Pläne hat US-Anlagenbauer Applied Materials. Er offeriert ebenfalls komplette schlüsselfertige Linien zur Produktion von Modulen aus Dünnschichtsilizium. "Wir sind optimistisch, dass wir schon kurzfristig Herstellkosten von weniger als einem Dollar ermöglichen können", sagt Christopher Beitel, Chef der Dünnschichtabteilung. Auf der solarpeq 2010, bzw. der parallel stattfindenden glasstec, der Weltleitmesse der Glasbranche, zu der Unternehmen auch solare Anwendungen präsentieren, werden die Amerikaner ihr Produktportfolio vorstellen. Darunter auch ihre Dünnschichtlinie "SunFab".

Nanosolar peilt 0,30 bis 0,35 Dollar pro Watt an

Noch ehrgeiziger sind die Pläne der US-Firma Nanosolar. Sie hat einen Herstellungsprozess entwickelt, bei dem winzige Nanopartikel aus Kupfer, Indium, Gallium, Selen und eventuell Schwefel im "Rolle-zu-Rolle"-Verfahren auf eine Folie gedruckt werden. Auf 0,30 bis 0,35 Dollar (0,22 bis 0,25 Euro) wollen die Amerikaner mit ihrer innovativen Drucktechnik die Kosten senken - rund ein Drittel der Fertigungskosten des 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 José, Kalifornien, will Nanosolar die Zellen herstellen und diese dann in Luckenwalde bei Berlin zu Modulen verschalten.

Kristalline Module glänzen mit hoher Effizienz

In der Dünnschicht-Photovoltaik stehen die Zeichen also klar auf Wachstum. Wie viele Hersteller ihre ehrgeizigen Ausbau- und Produktionsziele im zeitlich vorgegeben Rahmen erreichen, ist aber offen. Verzögerungen sind keine Seltenheit: Bis eine Technik die Serienreife erreicht, vergehen oft viele Jahre: Industrietaugliche Herstellungsprozesse müssen entwickelt, viel Geld in Forschung und Tests investiert werden. 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.

Viel Zeit, um serienreife Produkte zu präsentieren, haben die Dünnschicht-Newcomer aber nicht. Denn die kristalline Konkurrenz treibt die Entwicklung neuer Techniken ebenfalls mit hohem Einsatz voran: Wirkungsgrade steigen, Kosten fallen. Wissenschaftler glauben deshalb, dass an der konventionellen Solartechnik auch künftig kein Weg vorbeiführen wird. "Kristalline Siliziumzellen werden weiterhin eine dominierende Rolle spielen", sagt Stefan Glunz, Leiter der Abteilung Entwicklung und Charakterisierung von Siliziumsolarzellen am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg.



Links: Halbleitercheck: Ein Mitarbeiter des chinesischen Herstellers Suntech Power präpariert die Solar-Wafer zur Zellenproduktion. Rechts: Bereit für den Markt: Nach der Produktion werden die kristallinen Siliziummodule von Suntech ins Lager gebracht. Fotos: Suntech Power

Hochleistungszellen aus China und den USA

So herrscht auf der oberen Wirkungsgradskala ein reger Wettstreit um die besten Konzepte: Forscher der University of New South Wales in Sydney, Australien, erreichten mit einer monokristallinen Zelle im Labor 24,7 Prozent Wirkungsgrad - diesem Weltrekord kommt die Industrie immer näher. Das chinesische Solarunternehmen Suntech Power etwa bietet seit diesem Sommer ein Modul an, das sieben Prozent mehr Strom erzeugt als sein bislang leistungsstärkstes Paneel. Herzstück der Technik sind neuartige so genannte Pluto-Zellen, die dank einer speziell behandelten Oberfläche und dünneren elektrischen Kontakten auf der Vorderseite mehr Licht absorbieren. Dadurch steigt der Wirkungsgrad von 15,2 auf bis zu 17,5 Prozent bei multikristallinen Zellen und von 17,2 auf bis zu 19 Prozent bei monokristallinen. Das Herstellungsverfahren basiert auf Know-how aus Deutschland: 2008 hat Suntech den Schwarzwälder Anlagenbauer KSL Kuttler übernommen, der Ausrüstung und Automation für die Pluto-Fertigung liefert.

Großes Potenzial sprechen Experten auch Rückkontakt-Solarzellen zu. Stromsammelschienen und Kontakte befinden sich hier nicht auf der Vorder-, sondern komplett auf der Rückseite der Zelle, so dass sich die solaraktive Fläche des Moduls vergrößert. Der führende Hersteller von Rückseitenkontakt-Zellen, das US-Unternehmen Sunpower, fertigt bereits Zellen mit mehr als 20 Prozent Wirkungsgrad. Damit produzierte Module erreichen 19,6 Prozent bei einer Nennleistung von 315 Watt - kein aktuelles Modul hat mehr Power.

Siliziumpreise fallen

Sinkende Siliziumpreise spielen den Herstellern in die Hände: Die Nachfrage nach dem Halbleiter wuchs in den vergangenen Jahren so stark, dass die Hersteller mit dessen Produktion kaum hinterher kamen. Das hat die Spotmarktpreise 2008 auf bis zu 400 Dollar (etwa 285 Euro) pro Kilogramm getrieben. Jetzt, da die Solarbranche wegen der Krise nicht mehr so rasant wächst, wird Silizium deutlich billiger: Nur noch 75 Dollar (circa 53 Euro) mussten dafür laut Marktforscher iSuppli im Juni 2009 gezahlt werden, Tendenz weiter fallend.

Dünnschicht auf großen Dächern und im Freiland

Die Dünnschicht-Hersteller werden also hart um Marktanteile kämpfen müssen. Vorerst dürfte es ihre Technik wegen der relativ niedrigen Effizienz vor allem dort schwer haben, wo viel Leistung auf wenig Fläche erbracht werden muss. Hausbesitzer in Ländern mit attraktiver Solarförderung, wie zum Beispiel in Deutschland, werden ihr Dach eher mit kristallinen Siliziumpaneelen bestücken,

weil diese pro Quadratmeter Fläche mehr Strom erzeugen und eine Einspeisevergütung erwirtschaften, mit der sich der Preisnachteil gegenüber der Dünnschicht mehr als aufwiegen lässt. Kurzfristige Chancen bieten sich den Dünnschicht-Modulen hin gegen auf großen Industrie- und Gewerbedächern oder im Freiland, wo reichlich Platz vorhanden ist und es weniger darum geht, auf einer begrenzten Fläche maximale Leistung zu generieren. Auch können Dünnschichtmodule wegen ihrer Flexibilität und des geringen Gewichts besser als stromerzeugende Fenster oder Fassaden in die Gebäudehülle integriert werden. So verbessern sie nicht nur die Energiebilanz eines Gebäudes, sondern erweitern auch den gestalterischen Freiraum der Architekten und Planer. Zur letzten glasstec im Oktober 2008 waren bereits zahlreiche kreative Lösungen gebäudeintegrierter Photovoltaik in Düsseldorf zu sehen.



Grenzenlos solar: Die aus kristallinen Modulen von aleo Solar bestehende Freilandanlage "Vidana" mit vier Megawatt Leistung ist nur eines von vielen Solarkraftwerken in Spanien.

Dünnschicht-Produktionskapazitäten im Aufbau

Mehr als Nischenprodukte werden CIS, CdTe & Co, wenn die Hersteller ihre Ankündigungen wahr machen und ihre Fertigungskosten binnen kurzer Zeit drastisch reduzieren. Schließen die schlanken Stromgeneratoren dann auch noch bei der Effizienz zu ihren kristallinen Konkurrenten auf, könnten sie sogar zur dominierenden Solarstromtechnik avancieren. Theoretisch kann die Dünnschicht also viel bewegen, doch nun müssen die Unternehmen ihre Ideen erst mal in Produktions-Kapazitäten umsetzen. Nur 800 MW spuckten ihre Fabriken 2008 aus, davon stammten allein 500 MW aus First Solar-Linien - in der konventionellen Photovoltaik wurde laut EPIA im vergangenen Jahr sieben Mal mehr hergestellt. Messen wie die solarpeq und glasstec 2010 werden zeigen, in welche Richtung die Entwicklung gehen wird - denn in kaum einer Branche ist der kostensenkende Einfluss von Innovationen in der Fertigungstechnik in Zukunft so entscheidend.

Effizienz- und Kostenpotenzial von Solarmodulen

	c-Si	mc-Si	CdTe	CIS	a-Si	a-Si/ μ c-Si
Von der Industrie erreichte Effizienz (in Prozent)	19,6	18,5	11,1	12	7	9
Erreichbare Effizienz (in Prozent)	>20	20	18	18	10	15
Herstellkosten pro Watt (in €)	2	1,50-2	0,67	2	1	1
erwartete Kosten ab 2020 (in €)	<0,5	<0,5	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3

Quellen: EU PV Platform, Recherchen von solarpeq

Legende: c-Si = monokristallines Silizium; mc-Si = multikristallines Silizium; CdTe = Cadmiumtellurid; CIS = Kupfer-Indium-Diselenid (CIS wird auch als Oberbegriff für andere auf Kupfer basierende Halbleiterverbindungen verwandt); a-Si = amorphes Silizium; a-Si/ μ c-Si = mikromorphes Silizium

Die Dünnschicht hat das Potenzial für ähnlich hohe Wirkungsgrade wie kristalline Siliziummodule. Dafür werden Siliziumpaneele 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.

Material: solarpeq. Der Solarserver dankt der Messe Düsseldorf für das Recht zur Publikation. Red. Solarserver: Rolf Hug.