

# Schlankheitskur für Zellen

DER SILIZIUMENGPASS HAT DEN INNOVATIONSPREIS DER PHOTOVOLTAIKBRANCHE BEFLÜGELT: PRODUKTIONSPROZESSE WERDEN VERBESSERT, NEUE ZELLENKONZEPTE SIND IN DER PIPELINE. UND IMMER DÜNNERE ZELLEN WERDEN KÜNFTIG DIE SONNE EINFANGEN.

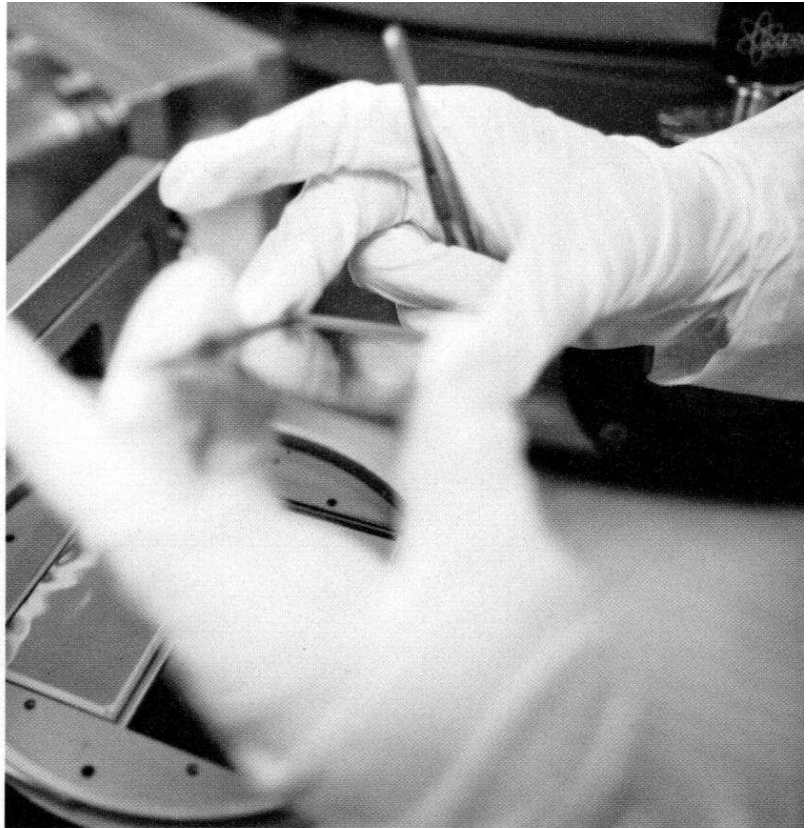
Text: Sascha Rentzing, Fotos: Axel Schmidt



**BLICK IN DEN „ZELLENBACKOFEN“:**  
Eine Forscherin des Hahn-Meitner-Instituts  
beobachtet den Herstellungsprozess einer  
Solarzelle in einer Cluster-Tool-Anlage.



**SOLARTECHNIK FÜRS ALL:** Titanzellen mit Wirkungsgraden von bis zu 30 Prozent.



**PRÄZISIONSARBEIT:** Die Produktion hauchdünner Solarzellen erfordert viel Fingerspitzengefühl.

Für die Photovoltaik (PV)-Branche lief es im vergangenen Jahr so gut wie noch nie. In Deutschland sorgte das „neue“ Erneuerbare-Energien-Gesetz für einen regelrechten Boom. Und auch in den anderen beiden Sonnenstaaten, Japan und den USA, zog die Nachfrage an. Resultat: 927 Megawatt (MW) Solarstromleistung wurden 2004 rund um den Globus aufgestellt, 62 Prozent mehr als im Vorjahr. Nichts, so schien es, würde den weltweiten Höhenflug der PV-Branche jetzt noch aufhalten können.

Aber dann kam alles anders. Kaum hatten sich die Zellen- und Modulhersteller auf die steigende Nachfrage eingestellt und ihre Produktionskapazitäten ausgebaut, wurde das Silizium knapp. Pech für die Unternehmen, die nun seit Monaten darauf warten, dass die Produzenten des begehrten Rohstoffs endlich für Nachschub sorgen.

Doch so unerwartet kam der Engpass auch wieder nicht. Er war, im Gegenteil, seit längerem absehbar. Peter Thiele, Deutschlandchef des japanischen Marktführers Sharp kann der „Verknappungssituation auch eine gute Seite“ abgewinnen. „Die Unternehmen haben erkannt, dass es ein ‚Weiter so‘ nicht geben kann und rasch neue, Material und Kosten sparende Lösungen her müssen. Das sorgt im Augenblick für reichlich Innovationen“, schildert er seine Marktbeobachtungen.

Und in der Tat: Weltweit stehen einige viel versprechende Technologien vor dem Sprung vom Labor in die Pilot- oder gar in die industrielle Fertigung. Wohin der technologische Trend geht, ist

klar: Dünn ist angesagt. Viele Firmen haben nicht nur ihre Produktionsprozesse optimiert, sodass sie nun weniger Silizium benötigen, sie werden bald auch neue Dünnschicht-Sonnenfänger aus Silizium und sogar organische Farbstoffzellen anbieten. Damit bekommt die ‚klassische‘, 250 bis 300 Mikrometer dicke Zelle nun schneller Konkurrenz als gedacht.

### Sharp „verschlankt“ seine Linien

Als weltweit größter Zellen-Produzent geht Sharp mit gutem Beispiel voran. Anfang 2004 hat der Konzern im Werk Katsuragi (Japan) seine zehnte Produktionslinie in Betrieb genommen und damit die Kapazität in dieser Fertigungsstätte von 315 auf 400 MW ausgebaut. Dass die Fabrik trotz des Siliziumengpasses fast voll ausgelastet werden kann, dafür sorgt ein neues Fertigungsverfahren. Es ermöglicht, Wafer mit einer Dicke von 180 statt wie bisher von 200 Mikrometern zu Zellen zu verarbeiten. So kann Sharp bei gleichem Materialeinsatz deutlich mehr produzieren.

Die schlanke Linie verfolgen die Japaner jedoch nicht nur im klassischen Siliziumbereich. Unter dem Produktnamen Lumiwall will das Unternehmen gegen Ende des Jahres auch ein fast durchsichtiges Dünnschichtmodul aus so genannten mikromorphen Siliziumzellen auf den Markt bringen.

Entscheidender Vorteil der Dünnschicht- gegenüber herkömmlichen Siliziumzellen: Sie werden nicht aus gesägten Wafern gefertigt, sondern durch Abscheiden hauchdünner Silizium-

schichten auf ein Trägermaterial. So können Zellstärken von nur wenigen Mikrometern erreicht werden und das Rohmaterial lässt sich vervielfachen.

Der Vorteil des mikromorphen Sharp-Sonnenfängers gegenüber anderen Dünnschichtzellen liegt in seiner Leistungsfähigkeit: Während etwa Zellen aus amorphem Silizium nur kurzwelliges Licht einfangen können, hat die sowohl aus einer amorphen als auch aus einer mikrokristallinen Schicht bestehende mikromorphe Zelle ihre Stärken im langwelligen Bereich. So kann sie das ganze Sonnenspektrum nutzen. Diese höhere Absorptionsfähigkeit zeigt sich natürlich im Wirkungsgrad. Das Sharp-Produkt erreicht mehr als sieben Prozent, amorphe Zellen wie sie etwa die RWE Schott Solar GmbH seit einiger Zeit anbietet, kommen dagegen nur auf sechs Prozent.

Lumiwall ist damit zwar noch längst nicht so leistungsfähig wie gängige Sonnengeneratoren, die heute im Schnitt Wirkungsgrade von 14 bis 16 Prozent erreichen. Aber das Potenzial dieser Technologie ist enorm. Das Forschungszentrum Jülich etwa hat mit diesen Doppeldecker-Zellen auf einer Fläche von 30 mal 30 Zentimetern bereits Wirkungsgrade von über elf Prozent erreicht. Sollten sich diese Ergebnisse in den nächsten Jahren auf eine größere Fläche und schließlich vom Labor in die serielle Fertigung übertragen lassen, wäre dies eine kleine Effizienzrevolution.

Auf den Durchbruch warten gleichfalls Dünnschichtzellen auf der Basis von Verbindungshalbleitern wie Kupfer-Indium Dile-

nid (CIS) und Cadmium-Tellurid (CdTe). Vor allem die hohen Anfangsinvestitionen haben die Firmen bislang davon abgehalten, in die industrielle Fertigung einzusteigen. Dabei schlummern auch in dieser Technologie große Potenziale: Im Labor konnten bei CIS Wirkungsgrade von 13 Prozent nachgewiesen werden. Die Würth Solar GmbH & Co. KG will bei dieser Technologie nun den Stein ins Rollen bringen (*neue energie* 10/2004). Nach Jahren der Forschung plant das Unternehmen, in diesem Jahr mit dem Bau einer 55 Million Euro teuren CIS-Fabrik mit einer Kapazität von 15 MW zu beginnen (siehe Seite 55).

### **Q-Cells setzt auf Dünnschicht**

Auch die Q-Cells AG, Deutschlands größter Zellenhersteller, ist bei seiner Suche nach alternativen, kostengünstigeren Zellkonzepten auf die Dünnschicht gekommen. Aus diesem Grund hat das Unternehmen zu Beginn des Jahres ein Joint-Venture mit dem US-amerikanischen Solarhersteller Evergreen Solar AG gegründet und sich überdies an der CSG Solar AG beteiligt, die 2004 aus der australischen Pacific Solar Pty Ltd hervorgegangen ist (*neue energie* 4/2005). Beide Firmen verfügen über Zellen-Herstellungsverfahren, bei denen nur sehr wenig Silizium benötigt wird. Evergreen stellt Sonnenfänger auf der Basis der String Ribbon-Technologie her, bei der Wafer ohne Sägeverluste direkt aus der Siliziumschmelze gezogen werden. Im Testbetrieb hat das Unternehmen, nach eigenen Angaben, gegenüber der „Sägetechnik“

rund 30 Prozent Rohmaterial eingespart. Auch die Wirkungsgrade von String Ribbon können sich sehen lassen: Die Zelle soll zehn bis zwölf Prozent des einfallenden Lichts ausnutzen.

CSG wendet die von Pacific Solar und der University of New South Wales, Sydney, entwickelten so genannte Crystalline Silicon on Glass-Technik an. Dabei wird – kurz gesagt – in wenigen Fertigungsschritten eine nur 1,4 Mikrometer dicke Siliziumschicht auf texturiertes, also speziell aufbereitetes Glas abgeschieden (siehe Grafik Seite 43).

„Die klassische Wafer-Silizium-Technologie wird für die nächsten zehn bis 15 Jahre unser Kerngeschäft bleiben. Aber wir müssen uns schon heute für morgen und übermorgen positionieren“, begründet Q-Cells-Vorstand Anton Milner die beiden Kooperationen. Für die solare Fachwelt dürfte vor allem interessant sein, wie sich die Crystalline Silicon on Glass-Technik in der Praxis macht. Forschungseinrichtungen wie etwa das Berliner Hahn-Meitner-Institut beschäftigen sich seit Jahren mit dem Züchten polykristalliner Siliziumschichten auf kostengünstigen Substraten wie Glas, um von der mit hohen Siliziumverlusten verbundenen Sägetechnik wegzukommen.

Mit dem Bau der CSG-Fabrik mit einer Kapazität von 24 MW auf dem Q-Cells-Gelände in Thalheim ist bereits im Januar be-

gonnen worden; im nächsten Jahr soll die Produktion von zunächst zehn MW Modulen beginnen. Technikvorstand Paul Basore ist vom durchschlagenden Erfolg der rund anderthalb Quadratmeter großen Solarpanels überzeugt: „In unserem Modul kombinieren wir die Vorteile der Dünnschicht- mit der Silizium-Wafer-Technologie.“ CSG benötige wie Dünnschichtzellen nur wenig teures Silizium, erreiche im Gegensatz dazu aber höhere Wirkungsgrade und habe außerdem weniger Probleme mit elektrischen Leistungsverlusten. „Wir starten mit Produktionskosten von etwas mehr als 1,50 Euro pro Watt und einem Wirkungsgrad von etwa acht Prozent“, erklärt Basore. Schnelle Produktionssteigerungen vorausgesetzt, so seine Prognose, könnten die Kosten in den nächsten zehn Jahren auf fast einen Euro je Watt gesenkt werden. In der gleichen Zeit könne man durch Verbesserung der Zelleigenschaften auf Wirkungsgrade von zwölf Prozent kommen.

Wird Basores Prognose wahr, könnte CSG in der Tat eine ernst zu nehmende Alternative zur herkömmlichen Siliziumzelle sein. Die Produktionskosten für ein Watt liegen hier derzeit bei mindestens 2,50 Euro, also einen Euro über der normalen Zelle. Ein Manko von CSG ist jedoch, dass die recht schweren und unhandlichen Glaspanels bedeutend mehr Fläche benötigen als herkömmliche kristalline Module, um auf den gleichen Energie-Output zu kom-

### Die Grätzelzelle

Quelle: FH Kiel

### Nanotechnik vor dem Sprung: Farbstoffzellen

Für die Photovoltaik ist die Grätzel- oder Farbstoffzelle vor allem wegen ihrer enormen Kostensenkungspotenziale interessant. Das Nanokraftwerk kann viel schneller und einfacher gefertigt werden als normale Zellen – zumindest theoretisch. Noch hat die Technologie den Sprung in die industrielle Fertigung nicht geschafft. Aber das soll sich nun ändern. Einige Firmen wollen in die Produktion der hauchdünnen Sonnenfänger einsteigen.

Die Grätzelzellen ahmen die Photosynthese der Pflanzen nach. Eingerahmt von zwei leitenden Glasflächen nimmt eine Schicht des Pigments Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) das Sonnenlicht auf. Statt mit Chlorophyll fängt Grätzel Strahlungsenergie mit Farbstoffteilchen, die sich in dieser Schicht tummeln. Werden sie vom Licht getroffen,

geben sie ein Elektron aus ihrem Molekülverband ab. Dieses Elektron wird schnurstracks über das  $\text{TiO}_2$  zur leitenden Glas-schicht transportiert. Dieser Elektronenfluss bedeutet nichts anderes als elektrischen Strom.

Weiterer Vorteil der Grätzelzelle: Selbst bei trübem Licht schafft sie recht hohe Wirkungsgrade – elf Prozent sind bereits nachgewiesen worden. Dass es bisher bei der Übertragung in die serielle Fertigung Probleme gab, hängt mit ihrer Fluid-ähnlichen Zusammensetzung zusammen. Die Flüssigzelle war schlicht nicht dicht zu bekommen. Und auch an der Lebensdauer muss noch gefeilt werden: Der Farbstoff degeneriert bereits nach wenigen Jahren.

men. Im Markt wird sich bald zeigen, wohin die Reise für CSG geht. Das Produkt soll von 2006 an weltweit angeboten werden.

## Kein abrupter Technologiewechsel

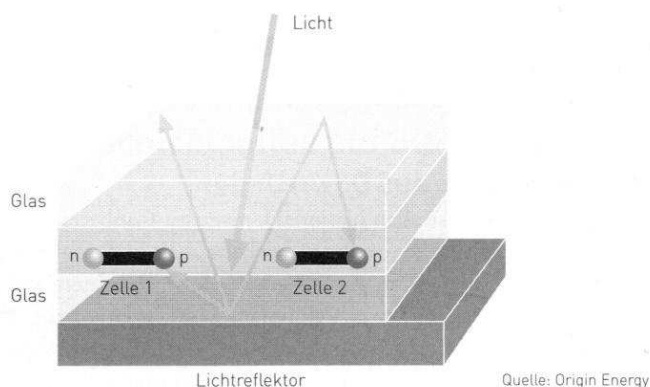
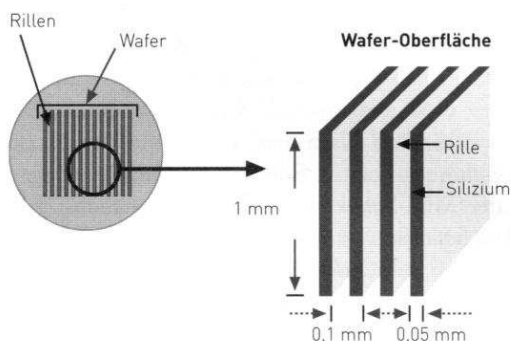
Doch weil neue Technologien wie CSG und String Ribbon nun den Sprung in die Fabriken schaffen, heißt das beileibe nicht, dass die Silizium-Wafer-Technologie plötzlich out ist. Bei den normalen Zellen gibt es noch reichlich Potenzial, um die Kosten pro Watt weiter zu senken. Forscher haben etwa bei polykristallinen Solarzellen Wirkungsgrade von über 20 Prozent nachgewiesen – ein Wert, an den ehrgeizige Solarfirmen wie Q-Cells in ihren Fabriken so schnell wie möglich rankommen wollen. „Derzeit erreicht unsere Q6 rund 15 Prozent“, sagt Milner, „mittelfristig wollen wir mindestens 17 Prozent schaffen.“

Kostensenkungen will Q-Cells aber nicht nur durch Verbesserung der Zelleigenschaften, sondern auch durch eine Optimierung der Fertigungsprozesse realisieren. Als Reaktion auf den Siliziumengpass geht das Unternehmen nun einen ersten Schritt in diese Richtung. Um am Standort Thalheim die neu geschaffene Kapazität von 290 MW zumindest annähernd auslasten zu können, sollen dort von Juli an durch den Einsatz dünnerer Wafer Zellen mit 220 statt 270 Mikrometer Dicke gefertigt werden.

Dem Trend zu schlankeren Sonnengeneratoren, wie ihn Sharp Anfang dieses Jahres losgetreten hat, folgen auch andere Hersteller. „Getrieben von der Rohstoffsituation“, sagt Gerhard Kleiss, Marketing-Chef der Solarworld AG, „gehen wir noch in diesem Jahr von 270 auf 240 Mikrometer runter.“ Technisch wäre es kein Problem, in den bestehenden Linien sogar noch weit dünnere Zellen herzustellen. Allerdings, so Kleiss, seien solche Stromerzeuger deutlich anfälliger für Bruch und damit schwerer handhabbar. „Die Modulhersteller würden Zellen unter 240 Mikrometer nicht nachfragen, da sie damit kaum umgehen könnten“, nennt der Solarworld-Mann das technische Limit.

Eine Möglichkeit, in der Silizium-Wafer-Technologie zu substanziellen Materialeinsparungen zu kommen, liegt damit schlicht in der Produktion stabilerer, besser handhabbarer Zellen. Das Fraunhofer ISE hat einen Weg aufgezeigt, wie das funktionieren könnte. Die Freiburger Forscher haben eine nur 160 Mikrometer dicke Zelle durch eine spezielle „Laserbehandlung“ der Rückseite (Laser-Fired-Contact-Technologie, LFC) so stabilisiert, dass diese nicht so leicht bricht, sprich: sich gut zu Modulen weiterverarbeiten lässt. Bis solche Verfahren von der Industrie umgesetzt werden können, werden unter Umständen jedoch Jahre vergehen.

### Die Stäbchenzelle



Quelle: Origin Energy

## Wenig Rohstoff, viel Power: Sliver cells

Was die Stäbchenzelle für die Photovoltaik so interessant macht, ist ihr geringer Siliziumverbrauch. Die neue, vom australischen Energieversorger Origin Energy entwickelte Zelle kommt mit nur zehn Prozent des bei herkömmlichen Verfahren eingesetzten Rohstoffs aus. Bei der Herstellung werden einen Millimeter dicke monokristalline Silizium-Wafer senkrecht zur Oberfläche so geätzt, dass eine Vielzahl 50 Mikrometer dicker, einen Millimeter breiter und zehn Zentimeter langer Streifen entsteht. Diese werden zu beidseitig aktiven Zellen verarbeitet. Um die bifacialen Sonnenfänger auch beidseitig der Sonne auszusetzen, werden

die in Glas gefassten Stäbchen mit einem Abstand aneinandergesetzt, der ihrer Breite entspricht. Auf der Modulrückseite wird ein Reflektor angebracht, der das Licht, das zwischen den Solarzellen durchfällt, an die Rückseiten spiegelt. Klarer Vorteil der Zelle neben ihrem geringen Siliziumverbrauch: Aufgrund ihrer höheren Lichtausbeute verspricht sie Wirkungsgrade von bis zu 18 Prozent. Bis sich vergleichbare Werte jedoch in der industriellen Fertigung realisieren lassen, vergehen unter Umständen noch Jahre. Origin erwartet zunächst nicht mehr als zehn Prozent.



PRÜFSTAND FÜR SONNENFÄNGER: Femto-Sekunden-Laser zur Untersuchung der Zelleigenschaften.

### Stäbchenzellen aus Down Under

So lange wird die Australian National University, Canberra, nicht warten müssen, bis es die von ihr entwickelte Zelle in die Fabriken schafft. Origin Energy Ltd, Australiens zweitgrößter Energieversorger, hat umgerechnet zwölf Millionen Euro in eine neue 25 MW-Produktionsstätte in Adelaide im Süden des Landes investiert und wird dort Ende dieses Jahres in die Produktion von Modulen aus den neuen so genannten „Sliver cells“ einsteigen. Beginnen will Origin mit einem Durchsatz von einem MW pro Jahr. Der Clou dieser Zellen: Mit 50 Mikrometern sind sie wesentlich dünner als ihre klassischen Konkurrenten.

Ein etwa ein Millimeter dicker monokristalliner Siliziumwafer wird dabei senkrecht zur Oberfläche so geätzt, dass eine Vielzahl 50 Mikrometer dicker, ein Millimeter breiter (entspricht der Dicke der Scheibe) und zehn Zentimeter langer Streifen entsteht (siehe Grafik Seite 41). Die Streifen werden so lange in dem Wafer gehalten, bis sie vollständig zu Sliver cells verarbeitet sind. Anschließend werden die Zellen herausgelöst und zu einem Modul verschaltet. Man muss sich diesen Vorgang vorstellen wie das Aufschneiden eines langen Brotlaibes, dessen Scheiben anschließend flach aneinander gelegt werden.

Einfach ist der Weg vom Wafer zum Modul bei dieser Technologie aber nicht, denn es muss extrem kleinteilig gearbeitet werden. Um ein Modul von einem Quadratmeter zu fertigen, bedarf es Tau-

sender von Stäbchenzellen. Nach den Worten von Phil Mackey, Leiter der Abteilung regenerative Energien bei Origin, gelingt die Verarbeitung der Mini-Solarkraftwerke jedoch auch bei hoher Geschwindigkeit fehlerfrei. Dass es Sliver cells aber von Beginn an mit normalen Zellen aufnehmen können, glaubt Mackey nicht. Allein der Aufbau von Produktionsanlagen und Infrastruktur wird Millionen verschlingen. Erst wenn viel hergestellt wird und gleichzeitig die Wirkungsgrade der Sliver cells weiter erhöht werden (derzeit: zehn Prozent), werden diese mit normalen Zellen konkurrieren können. „Der Schlüssel zum Erfolg sind hohe Produktionsvolumina“, sagt Mackey.

### Die Farbstoffzelle kommt

Von diesem Stadium ist die ebenfalls in Australien ansässige Dyesol Pty Ltd noch ein Stück weiter entfernt. Dyesol, ein Zusammenschluss der australischen Sustainable Technologies International und der schweizerischen Greatcell Solar SA, will Module auf den Markt bringen, die aus Millionen winziger organischer Farbstoffzellen bestehen. Eine Fabrik für diese Nanozellen sollte bereits 2003 gebaut werden, bisher scheiterte dieses Vorhaben jedoch, weil Investoren, die sich zunächst für das Projekt begeisterten, wegen technischer Bedenken letztlich doch abgesprungen sind.

Die Technologie, die Dyesol optimiert hat und nun in den großtechnischen Maßstab überführen möchte, ist nicht neu. Es handelt

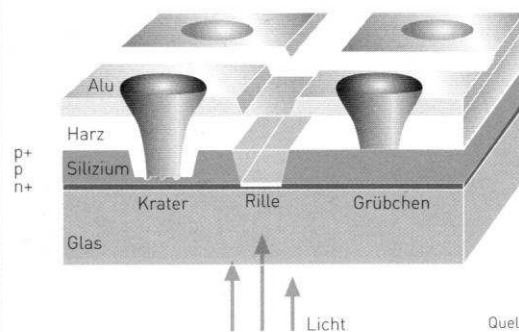
sich dabei um die 1992 patentierte Grätzel-Zelle (siehe Grafik Seite 40). Dieser vom Lausanner Wissenschaftler Michael Grätzel entwickelte Sonnenfänger ahmt die natürlichen Prozesse der Photosynthese nach. Eingerahmt von zwei transparenten, leitenden Glasflächen nimmt eine hauchdünne, nur Nanometer (0,000'001 Millimeter) dicke Schicht des Pigments Titandioxid Sonnenlicht auf. Statt mit Chlorophyll wird das Licht dort von Farbstoffmolekülen aufgefangen. Anschließend gibt der Farbstoff Elektronen an das Titan ab, von wo sie zur Elektrode diffundieren und schließlich als Strom abgeleitet werden können.

Gelingt es Dyesol, diese Technologie im Markt zu etablieren, kann sich die klassische Photovoltaik warm anziehen. Die Materialkosten für die Grätzelzelle sind marginal und mit Wirkungsgraden von schätzungsweise acht, neun Prozent liegen die kleinen Farbstoffgeneratoren nicht weit unter ihren australischen Dünnschicht-Konkurrenten, den Sliver Cells und den CSG-Glasmodulen. Außerdem können Farbstoffzellen aufgrund ihrer Flexibilität fast überall eingesetzt werden: in Fenstern, als elastische Solarfolie an Häuserfassaden, aber auch als massive Dach- oder Wandschindeln. Ihr großes Manko ist jedoch ihre Haltbarkeit. Grätzel-Zellen degenerieren deutlich schneller als Siliziumzellen und müssen darum recht rasch ausgetauscht werden.

Das Problem der geringen Lebensdauer organischer Farbstoffzellen kennt auch der US-amerikanische Technologiekonzern Konarka. Dennoch hat das Unternehmen in den USA vor kurzem die Pilotproduktion der Nanokraftwerke aufgenommen. Der Grund: Auf Folie lassen sich die Zellen so einfach, schnell und damit kostengünstig zu Modulen verarbeiten, dass Konarka glaubt, mit diesem Produkt in einigen speziellen Anwendungsbereichen gut anzukommen. Vor allem da, wo Minisolaranlagen Batterien ersetzen können – in Elektrogeräten wie Laptops oder Handys. „Wir produzieren die Zelle wie Zeitungen im Rolle-zu-Rolle-Verfahren. Die photoaktiven Materialien werden einfach aufgedruckt“, erläutert Konarka-Deutschlandchef Jens Hauch den simplen Fertigungsprozess.

Um mit der Farbstoffzelle klassischen Wafer-Silizium-Technologie ernsthafte Konkurrenz zu machen, ist es aus seiner Sicht noch „sieben bis zehn Jahre zu früh“. Aber Konarka hat schon heute Dächer und Fassaden im Visier: „Das Potenzial von Nanozellen ist enorm“, sagt Hauch, „und wenn es nicht bald gelingt, die Kosten bei den normalen Siliziumzellen deutlich zu senken, wird die Nanotechnologie schneller da sein, als mancher sich derzeit vorstellen vermag.“ ◀

## Die CSG-Zelle



Quelle: CSG Solar AG

## Abgeschieden, nicht gesägt: Dünnschichtzellen auf Glas

Kristallines Silizium-Dünnschichtzellen gehört die Zukunft, sagen viele Forscher. Nun will die CSG Solar AG eine Variante dieser Technologie vom Labor in die industrielle Fertigung übertragen. Eine große Herausforderung, denn anders als bei der Silizium-Wafer-Technologie wird nicht gesägt, sondern die Siliziumschicht wird hauchdünn (1,4 Mikrometer) auf texturiertem Glas abgeschieden. Im konkreten Fall handelt es sich um drei Schichten unterschiedlich dotierten amorphen Siliziums, das bei einer Temperatur von 600 Grad kristallisiert. Anschließend wird die Siliziumschicht per Laser in einzelne ‚selbstständige‘ Zellen geschnitten, mit einer Reflektionsschicht aus Harz überzogen und schließlich prozessiert, sprich: durch Laser- und Tintenstrahltechnik werden die elektrischen Kontakte geformt (Krater und Grübchen). Die Zellen werden dann noch mit einer Aluminiumschicht versiegelt.

Vorteil dieser Sonnenfänger: Sie kommen mit bedeutend weniger Silizium aus als normale Zellen, haben aber eine ähnlich hohe Lebensdauer. Das macht sie zu einem potenziellen Low Cost-Produkt. Eine echte Alternative zur klassischen Siliziumzelle werden CSG-Zellen aber vermutlich erst werden, wenn ihr Wirkungsgrad weiter gesteigert werden kann – in der Pilotproduktion wird CSG nicht mehr als acht, neun Prozent erreichen.