



## Zum Abheben

Crystal Solar und Solexel arbeiten an ultradünnen Zellen – und haben finanzstarke Geldgeber gefunden

Pilotprojekt: Solexel produziert im kalifornischen Milpitas Solarzellen auf der Basis von Epitaxie-Wafern

**Um Kosten zu senken versuchen Forscher schon seit langem, kristalline Wafer direkt aus gasförmigem Silizium abzuscheiden. Auf dem Papier sind die sogenannten Epitaxie-Wafer der Königsweg, um die Siliziumproduktion, das Ziehen der Ingots und Sägen der Wafer zu umgehen – und dabei gleich noch den Siliziumbedarf zu reduzieren. Doch seit jeher standen dieser Technologie auf dem Weg zur Massenproduktion große Hindernisse im Weg – zwei amerikanische Start-up-Unternehmen behaupten nun, sie überwunden zu haben.**

In der noch verhältnismäßig jungen Branche der Photovoltaik kann Jürgen Werner sich schon ein bisschen wie ein Urgestein fühlen. Bereits in den 90er-Jahren beschäftigte sich der Forscher am Institut für Photovoltaik (IPV) in Stuttgart mit der Entwicklung von Epitaxie-Wafern. Die Idee hinter der Produktion dieser superdünnen Siliziumscheiben ist ebenso simpel wie einleuchtend: Wenn es klappt, lassen sich damit die hohen Verluste und die hohen Kosten bei der traditionellen Waferherstellung deutlich reduzieren. Doch die bislang angewendeten Verfahren zur Herstellung des Siliziums und das verlustreiche Sägen der Wafer ist nicht so einfach zu ersetzen, musste Werner herausfinden: »Wir haben lange an einem Prozess herumprobiert, der konkurrenzfähig sein könnte. Aber sogar bei den damals hohen Kosten für herkömmliche Wafer war unser Epitaxie-

Verfahren das nicht. Und heutzutage ist der Wettbewerb ja noch schwieriger.«

In seinen Augen gibt es drei Hauptprobleme, die bislang die Weiterentwicklung des Prozesses auf industriellem Maßstab verhindert haben. Zum einen seien die Kosten des eigentlichen Epitaxie-Prozesses zu hoch, außerdem habe man mit einer hohen Bruchrate bei den extradünnen Wafern zu kämpfen und schließlich sei es eine große Herausforderung, mit ihnen Zellen und dann Module zu bauen. Die Schwierigkeiten, die mit dem Epitaxie-Prozess verbunden sind, kennt Werner also aus erster Hand. Und seine Reaktion auf die von zwei Start-ups in Kalifornien angekündigten Wirkungsgrade, die sie mit ihren auf Epitaxie-Wafern beruhenden industriell hergestellten Zellen erreichen wollen, war: Gelächter.

Auch die Führungsmannschaften von Crystal Solar Inc. und Solexel Inc. zeigen Anflüge von Heiterkeit – allerdings aus

ganz anderen Gründen. Wer die Unternehmen besucht, die nur wenige Meilen voneinander entfernt am Ufer der San Francisco Bay zu finden sind, wird viel von »Durchbrüchen« hören, von »Umwälzungen« und »neu gemischten Karten«.

### Der Epitaxie-Prozess

Crystal Solar und Solexel verfolgen zwar dasselbe Konzept, um die Probleme der Epitaxie-Wafer-Herstellung zu lösen, es unterscheidet sich aber im Detail deutlich. Beide beginnen ihre Produktion mit einem quadratischen Wafer in Halbleiterqualität, der 0,72 Millimeter stark ist; die Produktion von Silizium, Ingots und Wafern wurde also nicht vollständig eliminiert. Allerdings kann das Substrat wieder verwendet werden, die traditionelle Waferproduktion spielt somit nur noch eine untergeordnete Rolle. Crystal Solar sagt, seine Basiswafer könnten mindestens 50 Mal ohne Qualitätsverlust genutzt werden. Solexel sieht sich in der Großproduktion klar auf dem Weg dazu, die Basiswafer 100 Mal zu recyceln. Die Substratwafer kosten nach Auskunft von Crystal Solar pro Stück 10 bis 12 Dollar (7,78 bis 9,33 Euro). Bei einer 50-fachen Wiederverwendung kommen somit immerhin 6 bis 8 US-Cent (5 bis 6 Eurocent) an Kosten pro Watt hinzu. Zum Vergleich: Deutsche Equipmenthersteller wie Centrotherm und Gebr. Schmid bieten heute schon Fabriken an, mit denen sich Solarzellen zu rund 40 Eurocent pro Watt produzieren lassen (PHOTON 8-2012).



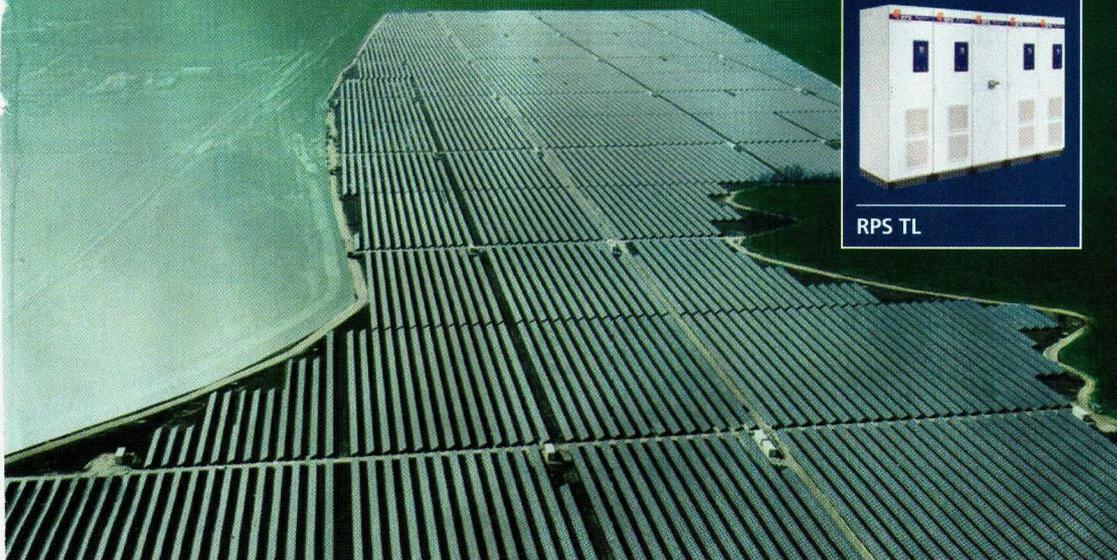
**Zerbrechlich:** Bei Solexel werden ultradünne Wafer, die noch mit dem wiederverwendbaren Substrat verbunden sind, in ein Ätzbad getaucht

Im nächsten Prozessschritt wird auf das Substrat in einem speziell entwickelten Prozess eine poröse und nur wenige Mikrometer starke Siliziumschicht aufgebaut. Hohe Temperaturen geben ihr eine Struktur, die als Grundlage für das Wachsen eines dünnen, monokristallinen Siliziumwafers durch chemische Gasabscheidung (Chemical Vapor Deposition, CVD) dient. In dem Epitaxie-Reaktor dient dabei Trichlorsilan als Ausgangsmaterial. Der so entstehende Epitaxie-Film bildet dabei dieselbe Struktur aus, wie der darunter liegende konventionelle Substratwafer. Anstelle der Standarddicke von 180 Mikrometern ist die aufgebraachte Schicht allerdings nur 20 bis 60 Mikrometer stark. Nach Ansicht beider Firmen liegt die für

die Zellproduktion optimale Dicke etwa in der Mitte, also bei 40 Mikrometern.

Crystal Solar und Solexel haben jeweils Epitaxie-Reaktoren im Pilotmaßstab entwickelt, die 300 bis 440 Wafer pro Stunde produzieren können. Auch in der Art, wie sie das Trichlorsilan in den Reaktoren einsetzen, sehen die beiden Unternehmen einen entscheidenden Fortschritt. Die Ausbeute eines typischen Siemens-Reaktors, worin ebenfalls Trichlorsilan als Silizium abgeschieden wird, liegt im Bereich von 20 Prozent. Eine bessere Ausbeute lässt sich nur erzielen, wenn das bei der Reaktion als Nebenprodukt anfallende Siliziumtetrachlorid wiederverwertet wird. Der übliche Weg besteht heute darin, dieses in Konversionsreaktoren wieder in Tri-

## Für die Sonnenenergie der Welt



RPS TL

PV-Wechselrichter mit höchster Effizienz, entwickelt und gebaut auf der Grundlage jahrzehntelanger Erfahrung. Die modulare Serie RPS TL für Anlagen ab 280 kWp ist weltweit im Einsatz. Komplet in einer Station zur direkten Einspeisung in das Mittelspannungsnetz. Oder in der Outdoor-Version dezentral installiert. Für jeden Fall die passende Lösung. Mit höchster Effizienz.

[www.bonfiglioli.com](http://www.bonfiglioli.com)

**Bonfiglioli**  
power, control and green solutions

BONFIGLIOLI VECTRON GmbH  
Europark Fichtenhain B6  
47807 Krefeld  
Tel.: +49 (0)2151 8396 0  
E-Mail: [info@vectron.net](mailto:info@vectron.net)



In guter Gesellschaft: Mehrdad Moslehi, Gründer und Technologie-Chef von Solexel, sowie Geschäftsführer Michael Wingert (links) vor ihrer Pilotanlage für Epitaxie-Wafer in Milpitas

chlorsilan umzuwandeln und erneut in den Prozess einzuschleusen. Solexel rechnet mit einer Ausbeute beim Waferprozess von 20 bis 25 Prozent ohne Recycling und 75 Prozent, wenn das Siliziumtetrachlorid wiederverwertet wird. Die Primärausbeute des Epitaxie-Reaktors ist also in etwa identisch mit der herkömmlicher Siemens-Reaktoren; Solexels Erwartungen für die Recyclingrate könnte dagegen übermäßig

optimistisch sein. Crystal Solar gibt an, man könne ohne Siliziumtetrachlorid-Recycling eine Ausbeute nahe 60 Prozent erreichen. In der Massenproduktion will das Unternehmen die Ausbeute schrittweise auf 80 Prozent steigern. K.V. Ravi, Technologie-Chef bei Crystal Solar, sagt, durch die Nutzung mehrerer kleinerer Kammern werde der Einsatz des Trichlorsilans optimiert, die Verluste innerhalb des Reaktors sanken auf etwa 20 Prozent. Liege die Abscheidungsrate unter einem Mikrometer pro Minute, seien mehrere Abscheidungskammern erforderlich, um einen Ausstoß auf Industrieniveau zu erreichen. Hubert Aulich, Geschäftsführer der PV Silicon Forschungs- und Produktions-GmbH in Erfurt, meint, die Ziele, die sich Crystal Solar in diesem Punkt gesteckt habe, seien erreichbar. Dazu sei es nur wichtig, die Abscheidung bei niedrigen Temperaturen durchzuführen, was zu einer exzellenten Siliziumausbeute führe. Solexel arbeite dagegen mit Abscheideraten von mehr als drei Mikrometern pro Minute, was die geringere Ausbeute des Solexel-Reaktors erkläre. Nach den von den beiden Herstellern gelieferten Zahlen erfordern ihre neuen Prozesse im Vergleich zur konventionellen Waferproduktion etwa 85 Prozent weniger Silizium. Auch dies erscheint als eine sehr optimistische, aber keineswegs unmögliche Annahme.

### Ablösung der Zellen vom Substrat

In der Vergangenheit hatte sich die Ablösung des Wafers vom Substrat als einer

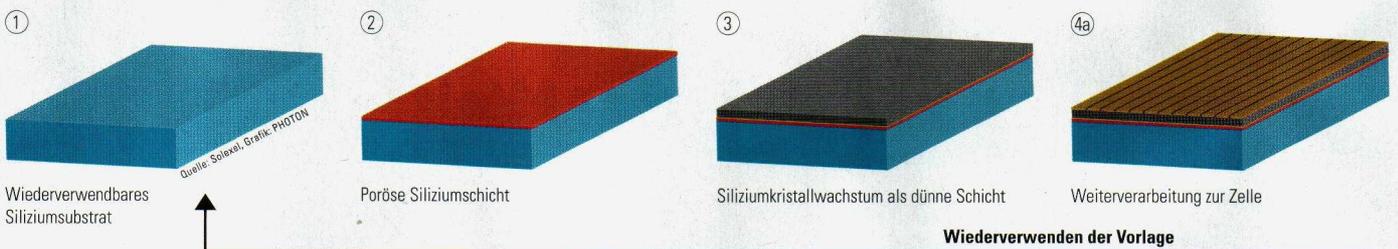
der größten Stolpersteine auf dem Weg zur Praxistauglichkeit dieses Prozesses erwiesen. Zu oft war die extrem dünne Siliziumschicht zerbrochen. Auch Jürgen Werner vom IPV machte bei seinen Versuchen die Erfahrung, dass es bei der »Defoliation« des porösen Layers sehr viel Bruch gab. Allein das habe die Skalierung des Prozesses auf industrielle Maßstäbe unmöglich gemacht. Die beiden kalifornischen Startups sind sehr stolz auf ihre Separationstechniken – wie sie genau funktionieren, wollen sie jedoch nicht verraten.

Klar ist aber, dass sie den Wafer mechanisch ablösen. Solexel nennt sein Verfahren »Lamination/Release«. Dabei wird die Zelle gleichzeitig mit dem Ablösen vom Substrat an einer flexiblen Rückwand fixiert. Crystal Solar verwendet ein ähnliches Verfahren. Hier wird die Zelle allerdings mit EVA (Ethylvinylacetat) gleich an das Glas der Modul-Frontseite geklebt und danach mit einer Absaugvorrichtung von der Unterlage abgelöst. Die Firma verrät keine Details, gibt aber an, dieser momentan noch manuelle Prozess habe eine Ausbeute von etwa 90 Prozent. Bei der Massenproduktion erwarte man eine Bruchrate von unter fünf Prozent.

### Konstruktion der Module

Auch die weitere Handhabung der extrem dünnen Wafer war bislang ein großes Hindernis auf dem Weg zur kommerziellen Produktion. Da es sich um einen Einkristall handelt, ist der Wafer zwar sehr flexibel, aber ausgesprochen anfällig bei

### SOLEXEL



### CRYSTAL SOLAR



Solexel und Crystal Solar verwenden beim Aufbau ihrer Wafer ein ähnliches Prinzip. Beim Zelldesign und bei der Weiterverarbeitung zu Modulen verfolgen die beiden Unternehmen

allen Folgeprozessen im Rahmen der Weiterverarbeitung zu Zellen und Modulen. Die Prozesse, die in beiden Unternehmen für das Ablösen und die Handhabung eingesetzt werden, basieren zwar auf konventioneller Produktionstechnik für Zellen und Module. Allerdings betonen beide Firmen, dass die Wafer niemals »freistehend«, also ohne stabilisierenden Träger, gehandhabt werden. Das würde unweigerlich zu hohen Bruchraten führen.

Crystal Solar verwendet einen mit 50 Mikrometern noch relativ dicken Wafer. Im Produktionskonzept dieser Firma werden zunächst alle an der Vorderseite der Zelle erforderlichen Prozesse ausgeführt, einschließlich der Kontaktierung (Tabbing). Erst danach werden die Wafer mit EVA an das Glas geklebt und vom Trägerwafer abgelöst. Es folgt der Aufbau der Modulrückseite: Das Aufbringen der üblichen BSF-Schicht (Back Surface Field) aus Aluminium führt typischerweise zu großen Belastungen für den empfindlichen Wafer. Stattdessen wird bereits während des Kristallwachstums im Reaktor Bor auf der Rückseite abgeschieden – so lässt sich ein Prozessschritt vermeiden, der für derart dünne Zellen schädlich sein könnte. Um das Licht besser einzufangen, wird an der Rückseite der Zellen nun noch ein Metallreflektor angebracht. Im letzten Schritt werden die Zellen getestet und für die Laminierung freigegeben.

Eine Methode, wie sie Crystal Solar verwendet, kann die Zellen- und Modulfertigung zweifellos erheblich vereinfachen.

So werden die Wafer in Chargen verarbeitet, die von Anfang an dieselbe Größe haben wie das spätere Modul. Ein weiterer Vorteil der neuen Verfahren: Alle Prozesse, die dem Reaktor folgen, lassen sich mit Standardausrüstung bewältigen. Crystal Solar wirbt bei seinen Modulen mit einem Wirkungsgrad von 18 Prozent. Das ist kein schlechter Wert, wenn man bedenkt, dass das Unternehmen weitgehend »08/15«-Ausrüstung einsetzt, die leicht verbessert werden könnte.

Der Ansatz, den Solexel beim Zellen-Design verfolgt, ist da schon wesentlich ambitionierter. Hier setzt man nicht nur auf einen mit 35 Mikrometern deutlich dünneren Wafer, sondern auch auf die vielversprechendsten derzeit verfügbaren Technologien zur Zellenproduktion, zum Beispiel Kontakte und Verbindungen auf der Rückseite sowie den Verzicht auf Silber. Dies soll zu Wirkungsgraden im Bereich von 20 Prozent führen und zu sogar noch günstigeren Kosten als bei Crystal Solar. Bei Solexel werden die meisten Zellprozesse ebenfalls dann ausgeführt, während der Wafer noch auf dem Substrat sitzt. Zur Stabilisierung der Zelle fügt Solexel aber noch eine Schicht hinzu, das so genannte »Planar Flex Backplane«. Dieses flexible Material erlaubt auch die Verbindung mit biegsamen Trägern, was zum Beispiel für den Einsatz bei gebäudeintegrierter Photovoltaik hilfreich ist. Einmal mit der Schutzschicht versehen, kann die Zelle in einem Modul-Montage-Prozess weiterverarbeitet werden, sehr ähnlich

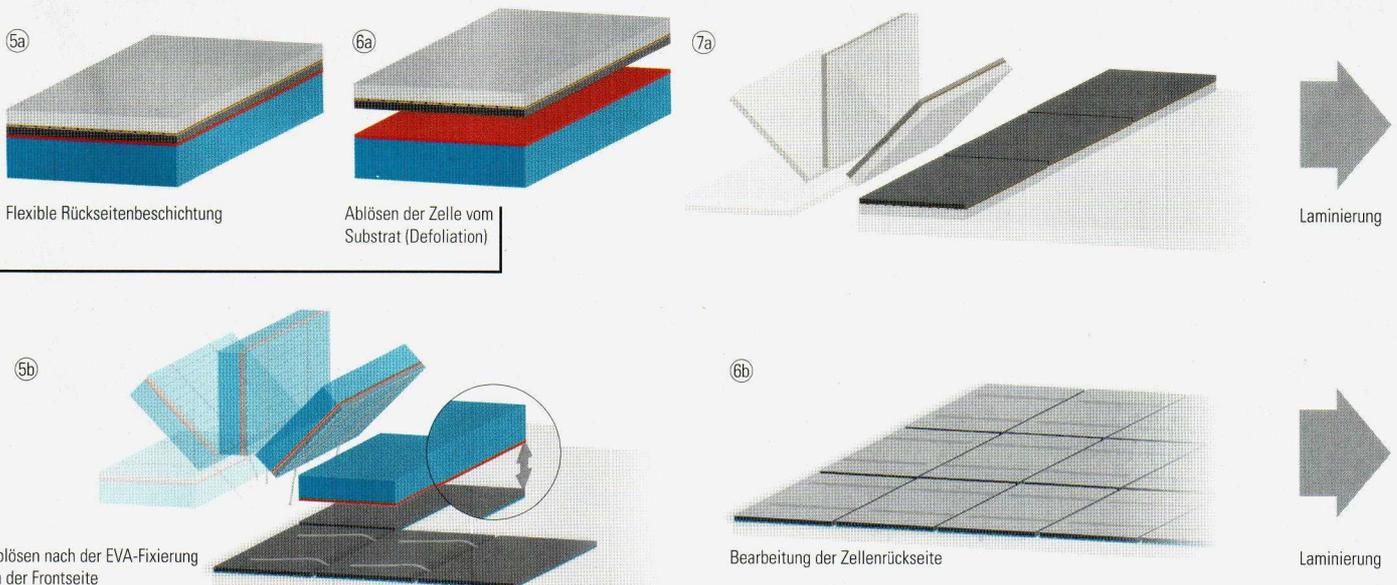
dem derzeitigen Standard – nur dass dabei am Ende bessere Erträge herauskommen. Das scheint gut möglich zu sein, wenn Solexel die Hürde der diffizilen Ablösung der Wafer vom Substrat nimmt.

### Die Zukunftspläne von Crystal Solar

»Technisch gesehen gibt es keine unüberwindlichen Hindernisse mehr«, versichert T.S. Ravi, Gründer und Geschäftsführer von Crystal Solar, während er neben dem wertvollsten Besitz seines Unternehmens steht, dem eigens entwickelten Epitaxie-Reaktor. Crystal Solar will seine Technologie in großem Maßstab nicht mit eigener Produktion kommerzialisieren. Stattdessen setzt man auf Joint Ventures. Dieses Geschäftsmodell sei der Grund, warum Crystal Solar mit mehreren Zellstrukturen arbeite, sagt Ravi: »Wir glauben, dass, wenn man diese Technologie voranbringen will, eine Umstellung



Nur ein paar Meilen die Straße hinunter, in Santa Clara, arbeitet T.S. Ravi, Geschäftsführer von Crystal Solar, mit seinem Team an derselben Technologie



allerdings unterschiedliche Ansätze.



**Pilotfabriken:** Im Epitaxie-Reaktor von Crystal Solar dient eine poröse Siliziumschicht als eine Art Saat, auf der mittels chemischer Gasabscheidung ein dünner, monokristalliner Siliziumwafer wächst

von Wafern normaler Stärke auf ultradünnen Silizium erforderlich ist, und zwar für eine Vielzahl von Zellarchitekturen. Wir glauben, dass all diese Architekturen mit nur geringfügigen Modifikationen umgestellt werden können. Jeder kann in die 50-Mikrometer-Technologie einsteigen, ohne dass die Qualität darunter leidet.« Die erste große Fabrik mit 10 bis 20 Megawatt Kapazität auf der Basis der Crystal-Solar-Technik sagt Ravi für Ende 2013 oder 2014 voraus. Sie soll Module mit einem Wirkungsgrad von 18 bis 20 Prozent herstellen. Wenn es gelingt, im nächsten Schritt die Kapazität auf 100 Megawatt auszubauen, würden die Produktionskosten nach seiner Schätzung auf 45 US-Cent (35 Eurocent) pro Watt fallen. Die Fabrik soll mit wenig Grundfläche auskommen – bei Investitionskosten von einem Dollar (78 Eurocent) pro Watt.

Solche Zahlen haben bereits die Aufmerksamkeit einiger Big Player in der Solarbranche erregt, wie ein Blick auf die ak-

tuellen Geldgeber von Crystal Solar zeigen: Unter ihnen ist Tokyo Electron Ltd., ein japanischer Hersteller von Photovoltaikproduktionsanlagen, sowie der norwegische Photovoltaikprojektentwickler Scatec SA. Mit von der Partie ist auch die Hanwha Chemical Corp., Muttergesellschaft des vertikal integrierten chinesisch-koreanischen Photovoltaikherstellers Hanwha Solar. Wie viel Geld Crystal Solar von den Investoren bekommen hat, will die Geschäftsführung nicht verraten. Aus dem »PV Solar Incubator Program« des US-Energieministeriums sollen aber bis zu 4 Millionen Dollar (3,11 Millionen Euro) fließen, zusätzlich zu den 15 Millionen Dollar (11,7 Millionen Euro), die Hanwha schon eingebracht hat.

#### Solexel setzt auf Rückseitenkontakte

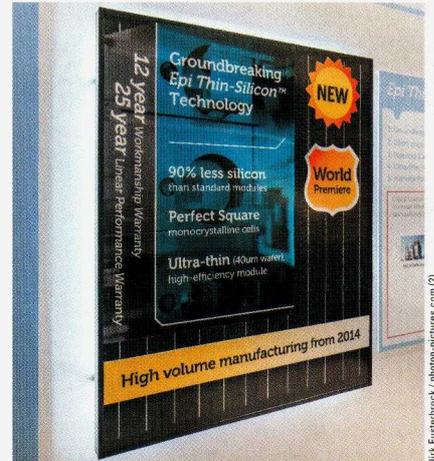
Genau wie Crystal Solar produziert Solexel bislang Epitaxie-Wafer in einer kleinen Pilotfabrik – und kann sich ebenfalls auf einige große Geldgeber stützen.

### Faszinierende Idee – aber schwer umzusetzen

Die am wenigsten effektiven Schritte im traditionellen Herstellungsprozess vom Silizium zum Modul abzuschaffen, ist sicher eine attraktive Idee. Die neuen ultradünnen Wafer enthalten nicht nur wesentlich weniger Silizium, sondern werden auch so produziert, dass viel weniger von dem Rohstoff vergeudet wird. Die Preise für Silizium sind zurzeit allerdings sehr niedrig – auf dem Spotmarkt lagen sie im Sommer bei gerade einmal rund 20 Dollar (16 Euro) pro Kilogramm. Da scheint die Reduktion des Siliziumverbrauchs für die Photovoltaikhersteller zunächst kein sonderlich drängendes Problem zu sein. Die neue Technologie hat aber noch eine Reihe

anderer Vorteile, die ihr zum Durchbruch verhelfen können, etwa die Zusammenführung der Wafer-, Zell-, und Modulprozesse. Diese Integration ist eine echte Revolution im Arbeitsablauf, bei der Abfallvermeidung und bei der Produktion in großem Maßstab. Allerdings kommen auch neue Materialien hinzu, zum Beispiel die flexible Rückseitenbeschichtung bei Solexel. Ob das einen Einfluss auf die Gesamtkosten haben wird, ist schwer einzuschätzen.

Bis ein derart komplexes Projekt allerdings in industriellem Maßstab serienreif ist, könnten noch Jahre ins Land gehen – wenn es überhaupt umsetzbar ist. *gm*



**Hanwha präsentierte auf der Solarmesse EU PVSEC ein erstes Modul mit den dünnen »Epi Thin-Silicon«-Zellen**

Das Unternehmen hat bei Investoren wie DAG Ventures LLC, Kleiner Perkins Caufield & Byers, Sunpower Corp. und Technology Partners schon an die 150 Millionen Dollar (117 Millionen Euro) eingesammelt. Das US-Energieministerium legte noch einmal 17 Millionen Dollar (13 Millionen Euro) drauf. Michael Winger, Geschäftsführer von Solexel, prognostiziert, sein Unternehmen werde Ende 2013 oder Anfang 2014 mit der Produktion von Epitaxie-Zellen mit Rückseitenkontakten sowie mit der Modulfertigung in großem Maßstab beginnen. 2011 hatte Solexel bereits eine Übereinkunft über ein Grundstück auf dem Senai Hi-Tech Park in Malaysia unterzeichnet. Dort beabsichtigt man zunächst, Zellen in einer 200-Megawatt-Fabrik zu produzieren. Die will Solexel dann von einem nicht näher bezeichneten Vertragspartner zu gerahmten Modulen mit und flexiblen Modulen ohne Glas weiterverarbeiten lassen. Dabei strebt das Unternehmen einen Modulwirkungsgrad von 20 Prozent an. »Hier werden die Karten neu gemischt, denn wir gehen mit dem Preis auf 42 US-Cent (33 Eurocent) pro Watt herunter«, verspricht der Solexel-CEO. Die besten Produzenten mit herkömmlicher Technik liegen heute bei rund 70 US-Cent je Watt – allerdings mit ambitionierten Kostensenkungsplänen für die nächsten Jahre.

Wirklich neu an den von den beiden jungen US-Unternehmen neu oder weiter entwickelten Technologien ist, dass sie in ein praktisch umsetzbares High-End-Produkt münden könnten, das in sehr großem Maßstab zu produzieren ist. Der enge Zeitplan, in dem das alles Wirklichkeit werden soll, erscheint allerdings sehr optimistisch. Garrett Hering, Guillermo Martínez