

Hocheffizienz herstellen: Am ISFH werden die Kontakte aufgedruckt.



# Die perfekte Zelle

Das Potenzial der kristallinen Siliziumtechnologie ist längst nicht ausgeschöpft. **Hocheffizienzzellen mit Wirkungsgraden über 20 Prozent**, optimierte Herstellungsverfahren und materialsparende Dünnschichtsilizium-Module stehen vor der Industriereife. Sie können Solarstromkosten erheblich senken.

Text: Sascha Rentzing

In seinem Grußwort zur 20-Jahr-Feier des Instituts für Solarenergieforschung Hameln (ISFH) im vergangenen Oktober gab Ulrich Stiebel beiläufig eine wichtige Investitionsentscheidung bekannt: Sein Unternehmen werde in der Region in die Herstellung einer am ISFH entwickelten Solarzelle einsteigen. Das Außergewöhnliche an dem Vorhaben: Der Holzmindener Hersteller von Haus- und Systemtechnik betritt mit der Photovoltaik (PV) völliges Neuland, will technologisch aber gleich ganz hoch hinaus. Stiebel Eltron plant die Fertigung neuer Hochleistungszellen mit einem Wirkungsgrad von rund 20 Prozent. Bei kristallinen Siliziumzellen werden heute im Durchschnitt Wirkungsgrade von 15 bis 17,5 Prozent erreicht.

Was die sogenannte Rise-Zelle (Rear Interdigitated Single Evaporation-Zelle) so effizient macht: Im Gegensatz zu Standardzellen befinden sich sämtliche Kontakte, die den generierten Stroms ableiten, auf der Rückseite. Ihre Front ist also völlig verschattungsfrei. So kann mehr Licht in sie eindringen und zur Stromproduktion genutzt werden.

Das Funktionsprinzip dieses neuen Typs ist simpel, seine Herstellung aber eine echte Herausforderung, denn Rückkontaktzellen sind völlig anders aufgebaut als Standardzellen. So ist die Herstellung und Trennung der elektrisch positiven und negativen Halblei-

ter viel schwieriger. Der so genannte Emitter befindet sich beispielsweise hinten statt vorne. Er hat die Aufgabe, die Elektronen aus den Zellen zu den Kontakten zu leiten.

Das ISFH hat nach eigenen Angaben dazu einen Herstellungsprozess entwickelt, der sich für den industriellen Einsatz eignet. „Unser Verfahren beruht auf der Anwendung von Lasern zum berührungslosen Strukturieren der Rückseite. Beide Kontakte werden durch Aufdampfen in einem einzigen Metallisierungsschritt hergestellt“, erklärt Jan Schmidt, Gruppenleiter Photovoltaik-Materialien am ISFH.

## Fünf Prozent mehr Wirkung

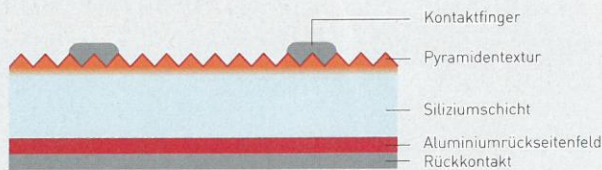
Gelingt die industrielle Fertigung der Rise-Zelle, würde Stiebel Eltron technologisch aus dem Stand zur Weltspitze der Solarhersteller gehören – und einen weiteren Beweis dafür liefern, dass auch bei der kristallinen Siliziumtechnologie die Effizienz weiter deutlich gesteigert werden kann. Der Wirkungsgrad-Weltrekord liegt derzeit bei 24,7 Prozent und wird von Wissenschaftlern der University of New South Wales in Sydney gehalten. Zwar wurde die Rekordzelle aus ‚Down Under‘ mit einem sehr aufwändigen Verfahren produziert, das für den industriellen Einsatz kaum in Frage kommt. Dennoch dürfte in den nächsten Jahren die Serienproduktion von Zellen möglich wer-

den, die diesem Wert zumindest nahekommen. Die Branche ist auf einem guten Weg: Die US-amerikanische Solarfirma Sunpower produziert bereits Zellen mit 21 Prozent Wirkungsgrad und ist damit am Markt sehr erfolgreich.

Das Streben nach immer höheren Wirkungsgraden macht überaus Sinn. Es ist vor Massenproduktion und Materialeinsparung der effektivste Hebel, um Kosten zu senken. Ein Prozent Wirkungsgradsteigerung kann eine Kostensenkung von fünf bis sieben Prozent ermöglichen, hat Wim C. Sinke errechnet, Solarforscher am Energieforschungszentrum Niederlande (ECN) und Vorsitzender der Arbeitsgruppe Wissenschaft, Technologie und Anwendung der EU Photovoltaic Technology Platform. Solarstrom könnte so in einigen Jahren preislich auf Augenhöhe mit konventionell erzeugtem Strom liegen. Noch ist die Photovoltaik weit von der Wettbewerbsfähigkeit entfernt: Die Sonnen-Kilowattstunde ist hierzulande mit rund 40 Eurocent etwa doppelt so teuer wie der Steckdosenstrom.

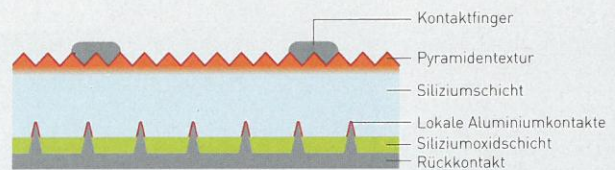
Außer mit Hochleistungszellen, wie die von Stiebel Eltron geplanten, lassen sich auch mit jungen Technologien wie der Dünnschicht Kosten senken. Neben Modulen aus Cadmium-Tellurid (CdTe) und Kupfer in Verbindung mit anderen Elementen (CIS-Zellen) haben Lichtfänger aus





### Die Standard-Zelle

Herkömmliche Silizium-Solarzellen sind relativ einfach aufgebaut. Meist verfügen sie über eine spezielle, durch Ätzen hergestellte Oberflächentextur (rot). Kleine Pyramiden reduzieren die Reflektion des Sonnenlichts und steigern so den Wirkungsgrad. Die dann folgende Siliziumschicht (hellblau) ist an der Vorderseite mit Phosphor und hinten mit Bor angereichert, man spricht von Dotierung. Dadurch entsteht zwischen den beiden Bereichen ein elektrisches Feld. Fällt Licht in die Zelle, werden Elektronen aus dem Halbleiter gelöst und stehen als freie Ladungsträger zur Verfügung. Sie hinterlassen Elektronenlöcher; beide trennen sich unter dem Einfluss des elektrischen Feldes: Die Elektronen wandern zur Vorderseite, die Löcher zur Rückseite. Fingerförmige Kontakte auf der Front und eine geschlossene Metallfläche auf der Rückseite sorgen für den elektrischen Kontakt nach außen. Das ganzflächige Aluminiumrückseitenfeld (blau) sorgt für eine elektrische Passivierung der Zelle. Es stellt also sicher, dass sich die vom Sonnenlicht erzeugten Elektronen an dieser Stelle nicht wieder mit den Elektronenlöchern neutralisieren und für den Solarstrom verloren gehen. Industriell gefertigte multikristalline Siliziumzellen dieses Aufbaus erreichen heute Wirkungsgrade von bis zu 15 Prozent, monokristalline Zellen zwischen 17 und 18 Prozent.



### Zelle mit lasergefeuerten Kontakten (LFC-Zelle)

Durch Einsatz von Lasertechnologie lässt sich der Wirkungsgrad von Zellen deutlich verbessern. Bei sogenannten Laser-Fired-Contact-Zellen werden die Rückseitenkontakte nur lokal mittels Laser hergestellt. Diese Behandlung stellt sicher, dass die Rekombinationsgeschwindigkeit der Ladungsträger an der Rückseitenoberfläche deutlich abnimmt. Eine zusätzliche Siliziumoxid-Schicht (grün) minimiert Strahlungsverluste, sorgt also dafür, dass weniger Sonnenlicht die Zelle ungenutzt verlässt. Verfahren zur Produktion von LFC-Zellen stehen unmittelbar vor der Industriereife. Unter anderem will die thüringische Solarfirma Ersol diese Technologie herstellen.

hauchdünnen Siliziumschichten das größte Potenzial. Beide deutschen Forschungshochburgen im Bereich der kristallinen Siliziumtechnologie, das ISFH und das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), arbeiten seit Jahren an dem Thema und haben experimentell bereits viel versprechende Ergebnisse erzielt: Sie stellen im Labor mittlerweile um ein Vielfaches dünner Zellen als heute üblich her, die aber mit 15 Prozent einen genauso hohen Wirkungsgrade erreichen.

Auch versuchen Firmen höhere Wirkungsgrade zu erreichen, indem sie die bestehenden Technologien und Produktionsverfahren verbessern. Das ist längst nicht so kostspielig wie der Aufbau einer neuen Hightech-Produktion, allerdings können durch bloße Veränderung einzelner Schichten keine wirklichen Effizienzsprünge erzielt werden. Darauf bedachte Firmen müssen also abwägen, welcher Weg der wirtschaftlich sinnvollere ist.

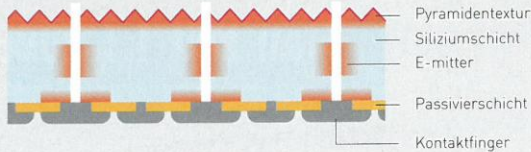
### Kontakte verbessern, Verschattung vermeiden

Optimierungen zielen prinzipiell darauf ab, Verluste durch Optik, elektrische Widerstände an den Kontakten sowie durch Rekombination zu verringern. Rekombination bezeichnet den Vorgang innerhalb der Zelle, bei dem sich negative Elektronen wieder mit den positiven Elektronenlöchern vereinen, aus denen sie zuvor Licht herausgeschlagen haben. Durch neue Materialien und Verfahren zur Passivierung und Entspiegelung der Zellenoberflächen kann der Wirkungsgrad ebenfalls um bis zu einem Prozent steigen. Passivierende Schichten halten positive und negative Ladungsträger davon ab, sich gegenseitig zu neutralisieren, außerdem sorgen sie durch eine Art Entspiegelung dafür, dass mehr Strahlung genutzt werden kann. Nicht zuletzt versprechen alternative Methoden zur Herstellung von Zellenkontakten mehr Effizienz. Vor allem der Suche nach letztgenannten Ver-

fahren widmen die Institute und die Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Unternehmen momentan viel Zeit. Die in der Industrie heute am weitesten verbreitete Technologie zur Herstellung von Vorderseitenkontakten ist der Siebdruck von Metallpasten. Dieses Verfahren ist zwar robust und etabliert, hat aber Nachteile im Hinblick auf die Qualität der Zelle: Breite Kontaktfinger behindern etwa den Lichteinfall, sie weisen hohe Widerstände sowie eine geringe Leitfähigkeit auf. Zudem wirken beim Drucken hohe mechanische Kräfte auf die Zellen. Sind die verwendeten Siliziumscheiben (Wafer) wie heute üblich 200 Mikrometer dick, können sie diesen Kräften problemlos standhalten. Um teures Silizium einzusparen, geht der Trend aber zu immer dünneren Wafers, die in Zukunft beim Druckverfahren leichter brechen könnten.

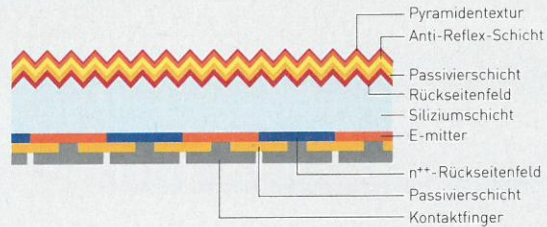
Das Fraunhofer ISE arbeitet deshalb an Metallisierungsverfahren, die ohne klassischen Siebdruck einen mindestens ebenso





### Emitter-Wrap-Through-Zelle (EWT-Zelle)

Emitter-Wrap-Through-Zellen haben im Gegensatz zu Standardzellen die Kontaktfinger auf der Rückseite, sie zählen daher im weiteren Sinne zu den Rückkontaktzellen. Durch das Herstellen der Kontakte auf der Rückseite bleibt die Vorderseite verschattungsfrei, wodurch mehr Sonnenlicht in die Zelle eindringen kann und sich die Effizienz erhöht. Die Kontaktfinger der Front lassen sich einsparen, indem die gut leitende Halbleiterschicht, der Emitter (orange), durch viele lasergebohrte Löcher auf die Rückseite geführt wird. Diese Löcher ermöglichen es den Ladungsträgern, den Weg durch die Zelle unbeschadet zu überstehen. Erste multikristalline EWT-Industriezellen des US-amerikanischen Solarherstellers Advent Solar kommen auf Wirkungsgrade von über 15 Prozent, zeitnah will die Firma über 16 Prozent erreichen.



### Quebec-Zelle

Bei der Quebec-Zelle, wie sie das Fraunhofer ISE und Q-Cells entwickelt haben, befinden sich alle Kontakte sowie der Emitter auf der Rückseite. Dadurch bleibt die Vorderseite der Zelle verschattungsfrei, wodurch mehr Sonnenlicht eindringen kann und höhere Wirkungsgrade möglich sind. Die Einstellung des Emitters auf der Rückseite ist allerdings nicht leicht. Q-Cells setzt auf die Behandlung der Zellenrückseite mit Lasern; dieses Verfahren wird derzeit in einer Pilotlinie getestet. Gelingt die Laserbehandlung, wäre Q-Cells der US-Firma Sunpower, dem bisher einzigen Hersteller von Rückkontaktzellen, technologisch einen Schritt voraus. Denn die Amerikaner arbeiten noch mit dem Siebdruckverfahren, einer Behandlungsmethode, die die Verwendung dünner Wafer nicht erlaubt.

hohen Wirkungsgrad aufweisen. Die Forscher setzten dabei vor allem auf die chemische Abscheidung von Metallen, wodurch sich feinste Kontaktstrukturen realisieren lassen. Das neueste Verfahren der Freiburger beruht allerdings auf einer anderen, zweistufigen Technik: Dabei wird mit einem speziell konzipierten Druckkopf zunächst ein Metallaerosol, in Luft schwebende Metallpartikel, in hauchdünnen Kontaktlinien auf die Zelle aufgebracht. Dabei entsteht ein Kontaktgitter, das durch galvanische Verdickung unter Beleuchtung der Zelle mit Metallen beschichtet und leitfähiger wird, um den Kontaktfingerwiderstand und damit den Energieverlust zu reduzieren. „Dieser Prozess ist industriell wesentlich einfacher umzusetzen als die direkte Kontaktierung des filigranen Vorderseitenkontaktgitters“, erklärt Stefan Glunz, Leiter der Abteilung Entwicklung und Charakterisierung von Siliziumsolarzellen am Fraunhofer ISE.

Für die Solarworld-Tochter Deutsche Cell ist die Zellen-Metallisierung ebenfalls ein wichtiges Thema. Das Unternehmen will seine Lichtfänger künftig mit feineren Stromsammelschienen ausstatten, um den

Wirkungsgrad um etwa ein Prozent zu steigern. Monokristalline Zellen der Deutschen Cell, das Premiumprodukt des Hauses, würden es dann auf 18 Prozent bringen.

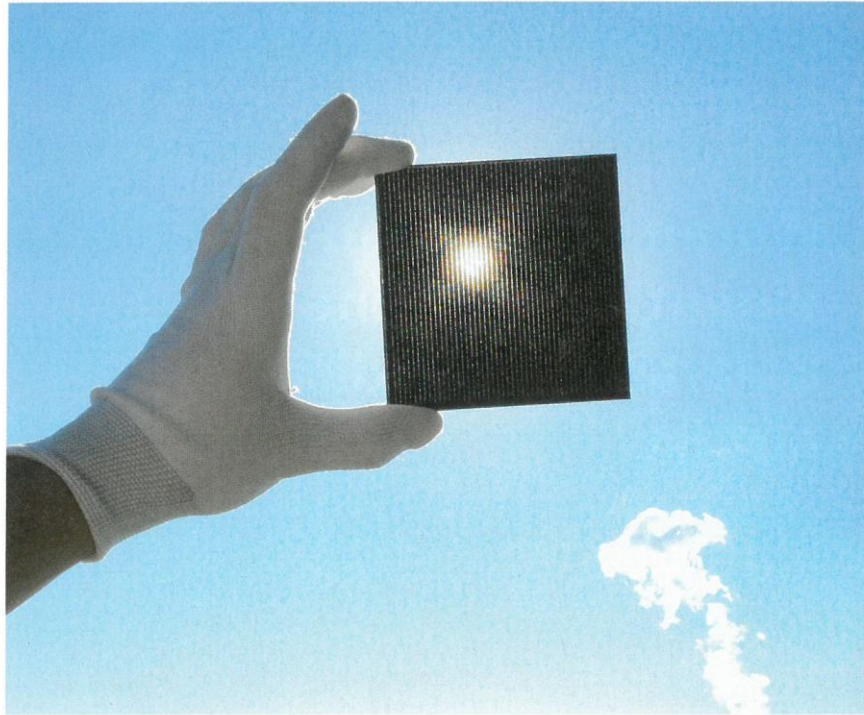
### Hochreines Silizium wird wichtiger

In diesen Bereich will kurzfristig auch der Erfurter Solarhersteller Ersol Solar Energy vordringen. Derzeit erreichen monokristalline Zellen der Firma laut Projektleiter Jan Lossen Wirkungsgrade von 16,8 bis 17 Prozent. Nun soll die Effizienz durch „graduelle Prozessoptimierungen“ sowie eine Verbesserung des Lichteinfangs an der Vorderseite gesteigert werden. Außerdem arbeitet Ersol gemeinsam mit ISFH und Fraunhofer ISE in einem öffentlich geförderten Projekt an der Entwicklung von Zellen mit lasergefeuerten Rückseitenpunktkontakten (LFC-Zellen, siehe Grafik). Mit dem Verfahren können nicht nur sehr dünne Wafer behandelt werden, LFC-Zellen erreichen auch deutlich höhere Wirkungsgrade als Standardzellen: Mit Punktlaser etwa wird eine bessere Passivierung der Rückseite erreicht als durch Siebdruck, wodurch an der Oberfläche weniger Ladungsträger verloren gehen.

In zwei bis drei Jahren will das thüringische Unternehmen die rückseitenkontaktierte Hochleistungszelle produzieren. „Wir verfolgen intern ein Programm für eine 20-Prozent-Zelle“, sagt Lossen. Im Mittelpunkt der Überlegungen steht dabei hochreines monokristallines n-Typ-Silizium. Dieser Stoff wird bereits bei der Herstellung mit geringen Dosen Phosphor angereichert (Phosphordotierung) und ist daher leicht negativ geladen. Der Vorteil von n-Typ gegenüber dem herkömmlichen bordotierten p-Typ-Silizium besteht darin, dass es bessere elektrische Eigenschaften hat: Es ist bei Beleuchtung stabiler, die Ladungsträger neutralisieren sich nicht so schnell, was bei Rückkontaktzellen unabdingbar ist. Dort fehlen Emitter und Kontakte an der Vorderseite, weshalb sich Elektronen und Elektronenlöcher durch die ganze Zelle hindurch bis zu den Kontakten auf der Rückseite bewegen müssen. In schlechterem Material würden sie sich schnell gegenseitig neutralisieren. Das hochwertige n-Typ-Silizium garantiert dagegen, dass sie den langen Weg unbeschadet überstehen.

Doch so leicht lässt sich der Wunderstoff nicht in der Produktion einsetzen. Denn





**Hightechbauteil:** Die Rise-EWT-Zelle des ISFH trägt alle Kontakte auf der Rückseite. Das ermöglicht Wirkungsgrade von über 20 Prozent.

die Herstellung des ladungsträgerleitenden Emitters ist bei negativ dotiertem Silizium ein Problem. Dieser muss positiv, also mit Bor versetzt sein. Der Prozessschritt ist wesentlich kritischer als die Dotierung des Siliziums durch Phosphordiffusion für ein positiv leitendes Grundmaterial. Die Bor-diffusion in eine industrielle Prozessumgebung einzubinden oder alternative Stoffe wie amorphes Silizium zu verwenden, ist eine große Herausforderung bei der Herstellung von Hochleistungszellen aus n-Typ-Silizium. Bisher haben dies im industriellen Maßstab nur Sunpower und der japanische Elektronikkonzern Sanyo bewältigt.

Unfehlbar sind deren Zellen aber keineswegs. Sunpower zum Beispiel drückt die Rückseitenkontakte auf, muss also mit relativ dicken Wafern arbeiten, da diese bei der Bearbeitung sonst brechen würden. An dieser Stelle bietet sich für innovative Firmen wie Ersol die Chance zu Verbesserungen: Würden die Zellenrückseiten etwa per Laser strukturiert, könnten deutlich dünnere Wafer eingesetzt werden, was Kosten und Material spart. Zudem gilt bei Rückkontaktzellen: Je dünner der Wafer, desto höher der Wirkungsgrad. Denn mit abnehmender Dicke reduziert sich der Weg, den die Ladungsträger zu den rettenden Kontakten zurücklegen müssen. Ob Ersol das Laser-Verfahren aber tatsächlich anwenden wird, bleibt unklar: „Entscheidend ist die günstige Herstellungsmethode“, sagt Lossen.

#### **Wann kommt Q-Cells Top-Zelle?**

Auch der sachsen-anhaltinische Zellengigant Q-Cells befasst sich mit dem Thema Rückkontaktzellen. Gemeinsam mit ISFH und Fraunhofer ISE haben die Thalheimer die sogenannte Quebec-Zelle entwickelt. Der per Lasertechnik strukturierte und daher potenziell kostengünstig herzustellende Stromgenerator bringt es im Labor auf 21 Prozent Wirkungsgrad. Die Pilotproduktion soll Firmensprecher Stefan Dietrich zufolge noch in diesem Jahr beginnen. In deren Verlauf wird sich entscheiden, ob Q-Cells die neuen Zellen seriell fertigen oder das Projekt abbrechen wird. Ausgeschlossen ist das trotz intensiver Forschungsarbeit und hoher Investitionen offenbar nicht. Laut Dietrich verfolgt das Unternehmen parallel weitere viel versprechende Hoch-effizienzkonzepte, bewahrt darüber aber noch absolutes Stillschweigen. In Thalheim ist man inzwischen, wie bei vielen anderen Herstellern auch, zugeknöpfter geworden. Angesichts der wachsenden Konkurrenz aus Asien und Nordamerika ist der Zugang zu den Laboren strikt untersagt. Eine Alternative zu Zellen aus hochreinem Silizium könnten „Emitter Wrap Through“-Zellen (EWT-Zellen, siehe Grafik) sein. Zwar erreichen sie nicht ganz so hohe Wirkungsgrade, sind aber deutlich günstiger herzustellen. Auch bei diesem Typ befinden sich die Kontakte auf der Rückseite, um mehr Lichteinfall von vorn zu ermöglichen. Aller-





Im Lichtschrank: Im Fraunhofer ISE werden Kontaktgitter durch galvanische Verdickung unter Beleuchtung aufgebracht.

dings bestehen EWT-Zellen aus vergleichsweise unreinem, dafür aber günstigem multikristallinem Silizium. Diese Art Silizium für Rückkontaktzellen zu verwenden, klingt zunächst unsinnig. Doch trotz der vielen Defekte des multikristallinen Siliziums, können Ladungsträger an der Rekombination gehindert werden: Damit es die freien Ladungsträger von der Vorder- zur kontaktierten Rückseite schaffen, wird der gut leitende Emitter durch eine Vielzahl von Löchern von der Front nach hinten geführt. Diese Löcher werden per Laser gebohrt – rund 20.000 pro Zelle. Man muss sie sich vorstellen wie schützende Röhren, die den Ladungsträgern einen sicheren Übergang ermöglichen. Bisher werden EWT-Zellen nur von der US-amerikanischen Solarfirma Advent Solar, einer Ausgründung der Sandia National Laboratories in Albuquerque, hergestellt. In seiner Fabrik mit 25 Megawatt Kapazität erreicht Advent Wirkungsgrade von 15,2 Prozent, etwas mehr als herkömmliche, multikristalline Siliziumzellen. Das Unternehmen hält es für möglich, den Wirkungsgrad um bis zu zwei Prozent zu steigern. Teures Material zu sparen ist auch die Kernidee, die hinter Dünnschichtzellen aus kristallinem Silizium steckt. Bis sie industriell hergestellt werden können, wird zwar noch einige Zeit vergehen, ISFH wie Fraunhofer ISE sind der Lösung aber auf der Spur: Sie verwenden Wafer, die mit 25 beziehungsweise 40 Mikrometer um ein

Vielfaches dünner sind, als heutige Standard-Siliziumscheiben (200 Mikrometer). Im Mittelpunkt stehen dabei die sogenannten Waferäquivalente. Das sind Substratschicht-Kombinationen, die wie eine herkömmliche Siliziumscheibe funktionieren und in konventionellen Fertigungsstraßen zu Zellen verarbeitet werden.

### Dünnschichtsilizium auf dem Vormarsch

Beim Fraunhofer ISE etwa wird zur Erzeugung eines solchen Waferäquivalents aus siliziumhaltigem Gas eine hochwertige Dünnschicht auf kostengünstigen Substraten als Trägermaterial abgeschieden. Dieses Gas ist im Gegensatz zum klassischen Silizium praktisch unbegrenzt verfügbar. Das ISFH geht einen Schritt weiter: Es stellt Wafer-Imitate her, die bis zu neun Mal wiederverwertet werden können. Sie bestehen nicht aus hochreinem Silizium, sondern aus einer einfachen porösen Schicht des Halbleitermetalls. So kann noch mehr Material gespart werden. Bei dem sogenannten PSI-Prozess wird auf das Substrat aus porösem Silizium eine Schicht hochwertiges Silizium abgeschieden. Dann wird die Zelle auf der leicht zugänglichen Oberfläche fertig gestellt, bevor sie mit dieser Seite auf Glas aufgeklebt wird. Die dünne Siliziumschicht lässt sich anschließend an porösen Sollbruchstellen vom Substrat ablösen. Nun wird die Rückseite der Zelle oder des Moduls gefertigt.

Der Substratwafer steht nach der Reinigung für die Herstellung einer weiteren Siliziumschicht zur Verfügung. „Mit dieser Technik können die Produktionskosten drastisch gesenkt werden“, sagt Schmidt. All diese Beispiele zeigen: Neue Zellen und Wege zur Verbesserung des Wirkungsgrades können schon heute mit relativ geringem Aufwand umgesetzt werden. Mit der kristallinen Siliziumtechnologie ist also auch künftig zu rechnen. Selbst wenn neue Dünnschichtmaterialien oder die Nanotechnologie mit Farbstoff- oder Plastikzellen Einzug in die Photovoltaik halten und deutliche Kostensenkungen versprechen – vom Markt verdrängen werden sie den Klassiker nicht. Die Effizienz von Hochleistungs- oder EWT-Zellen werden sie selbst langfristig schwerlich erreichen. Wahrscheinlich wird es in Zukunft ein Nebeneinander verschiedener Technologien geben, wobei Lichtfänger aus Silizium dominierend bleiben.

Das hohe Potential zur Optimierung und Kostensenkung sollte die Hersteller zu Optimismus und weiteren Investitionen bewegen, statt Regierungspläne zu kritisieren, die eine deutlichere Absenkung der Förderung vorsehen – sowohl in Deutschland als auch in Spanien werden solche Schritte erwogen. Stiebel Eltron könnte zum Vorbild für die Branche werden: Ohne große Worte zu machen, wird die Firma wahrscheinlich in die Produktion einer Hightech-Zelle einsteigen. ◀