



# Lastesel der Photovoltaik

Solarzellen aus multikristallinem Silizium sind die meist verkauften Sonnenlichtfänger. Einst als Auslaufmodell deklariert, konnten die dickschichtigen Module dank stetiger Weiterentwicklung die Konkurrenz auf Abstand halten. Start einer Serie zu den führenden Solarzellen-Techniken.

Text: Sascha Rentzing

Eigentlich sollte es die Technik gar nicht mehr geben. Als in den Neunzigerjahren der Bedarf an Photovoltaik(PV)-Anlagen stieg, galten Solarmodule aus multikristallinem Silizium nur als Übergangslösung. Die klobigen Zellen arbeiteten zwar verlässlich, galten mit durchschnittlich zehn Prozent Wirkungsgrad aber als ineffizient. Dünnere und leistungsstärkere Absorber sollten sie bald ersetzen.

Forscher in den USA ergriffen die Initiative. Über eine Milliarde Dollar Fördergeld pumpete Washington in den Neunzigerjahren in die Weiterentwicklung von Dünnschicht- sowie Mehrfachzellen, die bis dato Satelliten mit Sonnenenergie versorgten (neue energie 9/2009). In Deutschland und Japan wiederum fokussierten sich die Forscher auf monokristallines Silizium: Rückkontaktzellen mit verschattungsfreier Front und Heterojunction-Zellen, die so genannte HIT-Technik – monokristalline Zellen, ummantelt von amorphem Dünnschichtsilizium. Damit wurden Effizienzen von 20 Prozent angepeilt.

Heute müssen die Innovatoren eingestehen: Ihr anvisierter Technologiewechsel ist geplatzt.

Denn gegen die praxisbewährten und leicht herstellbaren Multis konnten sich die neuen Solar-techniken nicht durchsetzen. Multikristalline Technik war für die Massenproduktion bereit, Fertigungsequipment, sogar komplette Linien für Siliziumzellen, waren bereits zu kaufen. Als Anfang der 2000er Jahre chinesische Unternehmen in die PV drängten, um rasch Marktanteile zu gewinnen, war klar, auf welche Technik sie setzen würden. Firmen wie Suntech oder Yingli errichteten in kurzer Zeit gewaltige Multifabriken, etablierten die Siliziummodule als Leitprodukte. Heute dominieren multikristalline Module die Photovoltaik laut einer Marktanalyse von Photon mit 53 Prozent klar vor Monopanellen, die 2010 einen Marktanteil von 35 Prozent erzielten. Abgeschlagen mit zwölf Prozent folgt die Dünnschicht. Die Mehrfachzellen tauchen in den Marktstatistiken gar nicht auf.

## Schlappe Konkurrenz

Ob Dünnschicht- und Mehrfachzellen je aufholen können, ist fraglich, denn technische Fortschritte vollziehen sich hier viel langsamer



## SOLARZELLEN-TECHNIK

1954, in den Laboren der amerikanischen Firma Bell, registrierten bei Experimenten mit Silizium Mitarbeiter zufällig, dass Sonnenschein bei diesem Material zur Erzeugung von Spannung führte. Den Entwicklern wurde klar, welche Innovation sie da in den Händen hielten: Eine Platte, die nur in die Sonne gelegt werden muss und Strom produziert, ganz ohne Kraftstoff, ganz ohne mechanische Belastungen und Verschleiß. Es schien wie die Entdeckung des Perpetuum Mobile. Der Auftakt der Photovoltaik-Entwicklung: Bald wurden die ersten Solarzellen mit Wirkungsgraden von vier Prozent produziert. Es setzte ein spannendes Rennen um Wirkungsgrade und Kostenpotenziale ein. Ein Rennen, das noch nicht entschieden ist. Wir wollen in einer Serie diesen Wettkampf aufzeigen. Den Auftakt dazu macht multikristallines Silizium.



**Ein Körnchen Effizienz:** Metallbedampfung von Wavern im Reinraum. Mit Aluminium wollen Forscher den Wirkungsgrad erhöhen.

als erwartet. Beispiel CIS: Die kupferbasierten Dünnschichtzellen erreichen im Labor 20 Prozent Wirkungsgrad – mehr als jede andere Dünnschichttechnik und genauso viel wie multikristalline Laborzellen. Allerdings dümpeln industriell gefertigte CIS-Zellen noch bei durchschnittlichen Wirkungsgraden von zehn Prozent, und auch bei den Produktionskosten liegen sie offensichtlich noch über ihren kristallinen Konkurrenten. „Die Halbleiterabscheidung erweist sich beim CIS als großes Problem“, gesteht der Dünnschichtexperte Michael Powalla vom Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW).

Abgeschlagen sind auch die Mehrfachzellen. Die nur fingernagelgroßen Kraftprotze können zwar materialsparend in Konzentratorsystemen integriert werden und Licht mit bis zu 40 Prozent Wirkungsgrad in Strom umwandeln. Allerdings ist die Herstellung der Zellen noch nicht wirtschaftlich, da bis zu fünf verschiedene Halbleiter sauber aufeinander abgeschlossen werden müssen. Viele Konzentratorbauer setzen bei ihren Systemen daher inzwischen auf die weitaus billigeren Siliziumzellen.

Bei den Multis hingegen entwickeln sich Innovationen stetig und rasch. Der durchschnittliche Modulwirkungsgrad stieg in den vergangenen zehn Jahren um drei Prozentpunkte auf 14 Prozent. Und das Effizienzpotenzial ist noch längst nicht ausgereizt: „20-Prozent-Module sind

möglich“, sagt der Materialwissenschaftler Jan Schmidt vom Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH). Damit würde die multikristalline Technik in Regionen vordringen, die bisher monokristallinen Paneelen vorbehalten waren. Gleichzeitig fallen die Produktionskosten. Zwar machen die wenigsten Hersteller Angaben dazu, aber der Preisrutsch bei den Modulen spricht eine deutliche Sprache (neue energie 10/2011). Im Januar 2011 gab die Online-Plattform PV-Exchange Großhandelspreise von 1,74 Euro pro Watt für kristalline Module aus deutscher und von 1,47 Euro aus chinesischer Produktion an. Seitdem senkten die Produzenten ihre Preise um 40 Prozent.

Die Stellschrauben für Kostenersparnisse sind bekannt: Optimierte Zellschichten sorgen dafür, dass mehr Licht ausgenutzt wird und weniger der generierten Ladungsträger im Siliziumkristall verloren gehen. Bessere Maschinen produzieren bei geringerem Energieverbrauch mit höherem Durchsatz, stellen also pro Zeiteinheit mehr Zellen her. Zudem sinkt der Materialbedarf. Mit 0,2 Millimeter Dicke sind die Siliziumwafer, die Zellenrohlinge, inzwischen im Schnitt ein Drittel dünner als vor zehn Jahren. Und schließlich fällt der Siliziumpreis: Als im Jahr 2007 die PV erstmals richtig boomte, wurde der Rohstoff äußerst knapp, explodierte sein Spotmarktpreis auf 400 Dollar pro Kilogramm. Seither wird der Zellengrundstoff dank wachsender



**Ausrüster:** Deutsche Maschinenbauer zählen zu den führenden Anlagenbauern. Hier Rohröfen von Centrotherm.



**Energiefresser:** Der Energieverbrauch bei der Produktion von Siliziummodulen wird kritisiert.

## Solarglossar

### **Multikristallines Silizium:**

Wird in Blöcke gegossen und in Scheiben zerteilt. Beim Abkühlen bilden sich unterschiedlich große Kristallstrukturen, an deren Kanten Defekte auftreten, die die Effizienz schmälern.

### **Monokristallines Silizium:**

Wird aus einer hochreinen Siliziumschmelze gewonnen. Aus ihr ziehen die Hersteller einkristalline Stäbe, die sie dann in dünne Scheiben, in Wafer, schneiden.

**Amorphes Silizium:** ungeordnete Kristallstruktur.

**Dünnschichtzellen:** Kommen ohne das aufwendige Schneiden von Siliziumblöcken aus. Die Absorber werden direkt auf einem Träger wie Glas abgeschieden.

**Emitter:** Heißt die gezielt mit Phosphor angereicherte Vorderseite des Kristalls. Sie sammelt die in der Zelle generierten Ladungsträger und leitet sie zu den Frontkontakten.

Produktionsmengen immer billiger und steuert – so die Prognose von Analyst Simon Jäger, Dekabank – auf ein Rekordtief von 20 Dollar zu.

Klar ist aber auch: Ohne die Finanzkrise 2008 und 2009 wären multikristalline Module heute nicht so erfolgreich. Bevor die Rezession um sich griff, standen revolutionäre Konzepte aus monokristallinem Silizium in den Roadmaps fast aller Hersteller: Etwa die BJ-BC-Rückkontaktzelle (Back-junction-back-contact) oder die so genannte Perl-Zelle (Passivated Emitter with Rear Locally diffused), mit der Martin Green von der University of New South Wales in Sydney den Effizienzrekord bei Siliziumzellen mit 25 Prozent hält. Viele Hersteller hatten schon Kooperationen mit führenden Instituten angebahnt, um die neuen Monotechniken rasch zur Serienreife zu bringen und dann die Märkte aufzumischen. Doch als die Finanzkrise zum Sparen zwang, verabschiedeten sie sich von ihren ehrgeizigen Vorhaben und schlugen den kostengünstigeren Weg ein: Evolution bestehender Konzepte. „Es ist bis heute so, dass die Firmen Risiken vermeiden und stattdessen möglichst viel des produktionstechnischen Know-hows der vorherigen Stufe in die nächsten Generationen von Zellen- und Modulproduktionen hinüberretten wollen“, sagt Stefan Glunz, Leiter der Abteilung Solarzellen am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Ise) in Freiburg.

### **Evolution statt Revolution**

Das geht zum Beispiel mit multikristallinen Zellen mit Rückseitenpassivierung, der so genannten Perc-Technik (Passivated Emitter and Rear Contact). Bei Solarzellen werden durch die Zufuhr von Lichtenergie Ladungsträger getrennt und Spannung aufgebaut; auf der Vorderseite entsteht ein Elektronenüberschuss und auf der Rückseite ein positives Potenzial. Hier fließt der Strom bei Standardzellen über einen Aluminiumkontakt ab, der großflächig auf dem Wafer liegt. Durch das Aluminium ist der elektrische Kontakt zum Pluspol zwar gewährleistet, aber der direkte Kontakt zwischen Metall und Halbleiter führt dazu, dass sich negative und positive Ladungsträger auch gegenseitig auslöschen, im Fachjargon: rekombinieren. Die Entwickler nutzen deshalb einen Trick: Sie ersetzen das Aluminium durch eine neue Schicht, die Stromverluste reduziert. Eine so genannte dielektrische Passivierungsschicht, die aus Siliziumnitrid, Siliziumoxid oder Aluminiumoxid bestehen kann. Allerdings haben diese chemischen Verbindungen den Nachteil, dass sie Strom nicht leiten. Deshalb

müssen sie zusätzlich an einigen Stellen geöffnet werden, um die metallenen Stromanschlüsse dort hindurchführen und mit dem Halbleiter verbinden zu können.

Die Industrie zeigt großes Interesse an dem Konzept. Q-Cells beispielsweise hat dafür seine gesamten Pläne für die wesentlich komplexeren Back-junction back-contact-Zellen aufgegeben. Die Firma verspiegelt und passiviert multikristalline Wafer auf der Rückseite mit einer speziellen Siliziumnitrid-Schicht. Für die Kontaktierung nutzt sie den vom Ise entwickelten Laser-fired Contact-Prozess: „Wir schießen von außen mit Lasern auf das Aluminium und feuern es so durch unsere dielektrische Nanoschicht auf den Wafer“, erklärt Q-Cells-Cheftechniker Peter Wawer. Die Laserbehandlung lohnt sich: Durch die neue Rückseitenstruktur steige der Zellenwirkungsgrad in der Pilotproduktion auf 19,5 Prozent, bezogen auf das Modul auf 18 Prozent. 2012 soll die Technik unter dem Namen Quantum auf den Markt kommen.

Auch Schott Solar erreicht dank Perc-Technologie Moduleffizienzen von über 18 Prozent. Das Unternehmen will aber noch einen Schritt weiter gehen und diese Zellen künftig aus so genanntem Quasi-Mono-Material herstellen. Dieser neue Wafertyp, der dem multikristallinen Silizium zugeordnet wird, gilt in der Branche als eine Art Sprungbrett zur Wettbewerbsfähigkeit. Es wird wie einfaches multikristallines Material in Schmelztiegeln hergestellt, hat aber die Eigenschaften des höherwertigen monokristallinen Materials. „Wir erhoffen uns damit einen deutlichen Effizienzgewinn bei nahezu gleichbleibenden Produktionskosten. Solarzellen mit nahezu 20 Prozent Effizienz wurden bereits nachgewiesen. Damit sind Modulleistungen von über 280 Watt in Produkten mit 60 Zellen möglich“, sagt Schott-Solar-Entwicklungschef Klaus Wangemann.

### **Multis in Monoqualität**

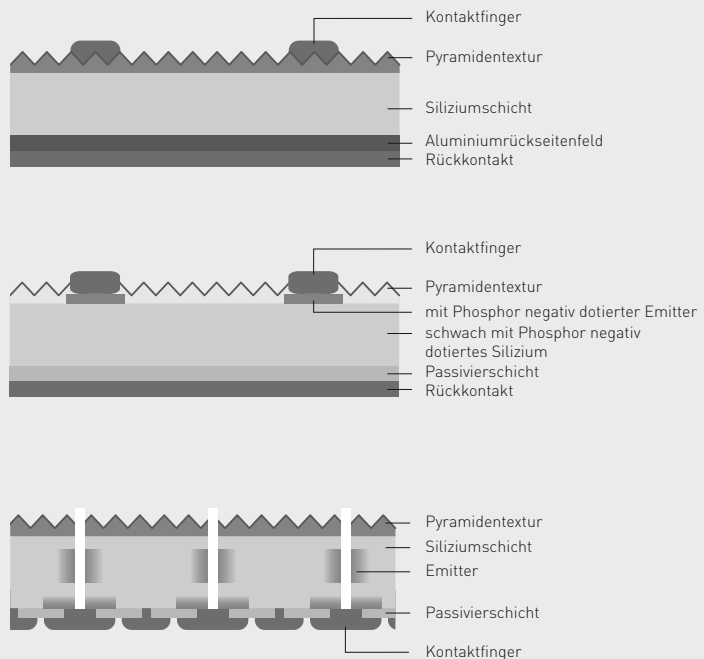
Vorreiter beim Quasi-Mono ist der chinesisch-kanadische Hersteller JA Solar (neue energie 10/2011). Er fertigte Anfang 2011 als erster Zellen mit 17,5 Prozent Wirkungsgrad und verbesserte damit die Effizienz gegenüber seinen Multi-Standards um einen Prozentpunkt. Normalerweise wird Silizium in einem speziellen Tiegel geschmolzen und anschließend kontrolliert abgekühlt. Beim Blockguss für multikristalline Blöcke richten sich die Kristalle unterschiedlich aus. In ihren Zwischenräumen entstehen Korngrenzen, jene Unregelmäßigkeiten, die die Stromaus-

Multikristalline Zellenvarianten

**Standardsiliziumzelle:** Sonnenlicht wird an der Oberfläche gebrochen und reflektiert. Es überträgt Energie an Elektronen im Silizium, die frei beweglich werden und zu den Frontkontakten wandern. Wo Elektronen fehlen, bleiben positive Elektronenlöcher zurück, die sich zum rückseitigen Pluspol bewegen.

**Zelle mit Rückseitenpassivierung:** Eine spezielle Schutzschicht auf der Rückseite vermindert elektrische und optische Verluste. Die Rückkontakte werden mithilfe von Lasern durch diese Schicht auf den Siliziumwafer gebrannt.

**Metal-Wrap-Through-Zelle:** Sie erlaubt einen höheren Lichteinfall, indem alle Stromsammelschienen auf die Rückseite der Zelle verlegt werden.



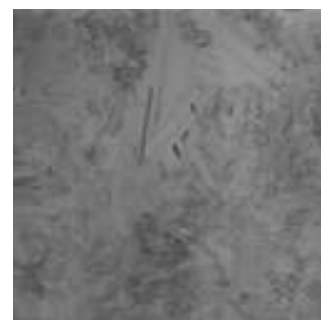
beute schmälern. JA Solar präpariert den Tiegelboden darum mit einer Platte aus einkristallinem Silizium als Saatkristall. Beim Abkühlen erstarrt der Halbleiter an diesem Kristall und übernimmt weitgehend dessen Orientierung. Dadurch werden effizienzschmälernde Defekte im Material vermieden. JA Solar verkauft die Technik bereits unter dem Namen Maple, Suntech folgte kurze Zeit später mit Blackpearl-Modulen. Schott will erstmalig 2013 Quasi-Mono für seine Zellen einsetzen.

Das Verbundprojekt Sunwins, an dem sich elf Firmen und 13 Institute beteiligen, arbeitet seit Februar 2011 ebenfalls an verbessertem multikristallinem Silizium. Sein Ansatz: den Blockguss so zu steuern, dass kaum noch kristallographische Defekte entstehen und weniger metallische Verunreinigungen aus den Tiegelwänden ins Material wandern. Es gebe gute Fortschritte, erklärt ISFH-Forscher Schmidt. „Wir sind guter Dinge, dass wir nach der dreijährigen Projektlaufzeit Ende 2013 Material haben werden, das an die Qualität von monokristallinem Silizium heranreicht.“

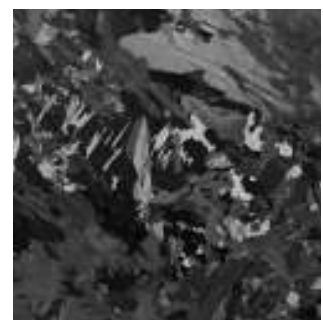
Mit sinkenden Material- und Produktionskosten rückt schließlich eine Technik in den Fokus der Hersteller, an die sie sich wegen der vergleichsweise schwierigen Produktion lange nicht

heranwagten: die so genannten Metal-Wrap-Through(MWT)-Zellen. Bei dem vom niederländischen Energieforschungsinstitut ECN entwickelten Ansatz werden die Stromsammelschienen intern auf die Rückseite durchgeführt. Dadurch liegen auf der Vorderseite weniger Leiterbahnen, die Licht von der Zelle fernhalten. Der Wirkungsgrad steigt, und gleichzeitig können die Module mit effizienteren Methoden gefertigt werden. Das ECN entwickelte schon vor Jahren eine multikristalline MWT-Zelle, die das Unternehmen Solland Solar zur Serienreife brachte. Nur fand sich drei Jahre lang niemand, der sie in Module einbauen wollte.

Jetzt geht es wieder voran. Schott Solar hat zusammen mit Solland eine Pilotlinie aufgebaut, will aber vorerst nicht in die Serienfertigung einsteigen. Bosch Solar, JA Solar, Kyocera und Canadian Solar schon. Letztgenannte Firma, die zwar in Kanada sitzt, aber ausschließlich in China produziert, will in diesem Jahr eine Fabrik mit 600 Megawatt Jahreskapazität errichten, die nur für diese Technik ausgelegt ist. Dort sollen dann multikristalline Module mit 16 Prozent Wirkungsgrad gefertigt werden. Will heißen: Multikristalline dominieren den Markt auf absehbare Zeit. Wer hätte das vor 20 Jahren gedacht. ◀



Die typische Oberflächenstruktur von Multikristallinen Solarzellen: heute...



... und gestern.