

Solarzellen – einfach gedruckt

Vakuumprozesse verteuern die Herstellung von Dünnschicht-Solarmodulen. Nicht so bei der Firma Nanosolar: Hier will man den Halbleiter auf Folie drucken – mit Tinte aus Nanopartikeln.

Ein schönes Leben hätte Martin Roscheisen sich machen können. Für den in München aufgewachsenen Informatiker war das kalifornische Silicon Valley seit Jugendtagen ein Traum. Den erfüllte er sich nicht nur mit einer Promotion an der Stanford University, sondern auch durch die Gründung von drei Internetfirmen. Zwischen 1999 und 2001 verkaufte der erfolgreiche Jungunternehmer alle drei Start-ups an Branchengrößen wie Yahoo und Ariba – mit einem Gesamterlös von 1,2 Milliarden US-Dollar.

Doch als Privatier hielt es der Neukalifornier in seinem Domizil in San Francisco nicht lange aus. Schließlich war er erst 33, und die nächste Firmenidee spukte bereits in seinem Kopf. „Es war klar, dass der Energiemarkt sich bewegen wird“, erzählt Roscheisen, der auf Englisch mittlerweile gewandter parliert als auf Deutsch und in seinem ursprünglichen Namen Röscheisen den Umlaut kurzerhand in ein für Amerikaner vertrautes „o“ verwandelt hat.

Ebenso klar war für ihn, dass „in der Photovoltaik die richtige Technologie den größten Unterschied ausmachen kann“ – besonders angesichts der jüngsten Fortschritte in der Materialwissenschaft. Nach einer mehrmonatigen weltweiten Tour durch Solarzellen- und Modulfabri-

ken sowie nach Gesprächen mit Dutzenden von Experten gründete Roscheisen in Palo Alto im Oktober 2001 seine vierte Firma: „Nanosolar“. Gründungspartner war der Unternehmensberater Brian Sager, ein alter Bekannter aus Stanford-Tagen. Die Geschäftsidee lautete: Solarzellen drucken.

Kostenmodellierungen hatten die beiden rasch überzeugt, dass hoher Durchsatz – möglichst große Stückzahlen pro Zeiteinheit – der beste Weg ist, um die Herstellung von Solarzellen deutlich billiger zu machen als bisher. Und der Prozess mit dem höchsten Durchsatz von allen ist das Bedrucken einer Folie von

Der Druckprozess ist zehnmal so schnell wie die konventionelle Fertigung von Solarzellen

Rolle zu Rolle – das geht laut Roscheisen mehr als zehnmal so schnell wie die konventionelle Herstellung von Solarzellen aus Siliziumscheiben oder die Produktion von Dünnschicht-Solarmodulen.

Zunächst experimentierten die Physiker und Ingenieure, die Roscheisen für Nanosolar rekrutierte, mit Farbstoff- und organischen Solarzellen. Dann schwenkte das junge Unternehmen jedoch auf den Verbindungshalbleiter Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) um. „CIGS liefert die höchste Effizienz und ist sehr haltbar“, begründet Roscheisen. Der Weltrekord für eine kleine CIGS-Solarzelle, den das National Renewable Energy Laboratory der USA in Golden, Colorado, hält, liegt bei einem Wirkungsgrad von 19,5 Prozent. Großflächige, kommerzielle CIGS-Solarmodule bringen es auf 9 bis 12 Prozent.

Für die Abscheidung der nur zwei Mikrometer dicken Halbleiterschicht auf Glas oder Edelstahlfolie nutzen die Hersteller bislang verschiedene Vakuumprozesse (siehe Kasten „Nanosolar-Konkurrenten“). Die Anlagen dafür – meist noch Prototypen – sind sehr teuer und erfordern eine ausgefeilte Prozesskontrolle, damit die CIGS-Schicht stets gleich stark aufgetragen wird. Zudem werden von den Ausgangsmaterialien je nach Verfahren nur 30 bis 80 Prozent direkt genutzt, der Rest landet an den Wänden der Abscheidungskammer oder im Recycling. Durch Drucken der Halbleiterschicht auf einen Träger betrüge die Verwertungsquote fast 100 Prozent.

Auch beim Bau der Fertigungsanlage winken Vorteile, argumentiert der Nanosolar-Chef. Die neue konventionelle CIS-Modulfertigung von Würth Solar in Schwäbisch Hall – siehe „Gute Qualität heißt: Viel Aufwand“ im Anschluss an diesen Beitrag – kostete 55 Millionen Euro. Für eine Beschichtungsanlage mit 100 Megawatt Jahreskapazität jedoch, in der Solarzellen wie abwaschbare Tapete auf eine Folie gedruckt würden, kalkuliert Roscheisen nur 15 Millionen Dollar (knapp 12 Millionen Euro).

Mit der neuen Technologie seien Fertigungskosten von nur noch 30 bis 35 US-Cent pro Watt Modulleistung erreichbar, sagt Roscheisen und verweist auf ihm vorliegende Gutachten. Die Herstellung der derzeit günstigsten Dünnschichtmodule aus Kadmiumtellurid kostet nach

Nanosolar-Chef Martin Roscheisen präsentiert links ein Reagenzglas voller Nanopartikel-Tinte. Mit ihr will er visionäre Druckprodukte erzeugen: Dünnschicht-Solarzellen (rechts: Labormuster).

KOMPAKT

- Das kalifornische Unternehmen Nanosolar will mit einem neuen Fertigungsverfahren weitaus preisgünstigere Solarmodule auf den Markt bringen als die gesamte Konkurrenz.
- Das Besondere an dem Verfahren: der völlige Verzicht auf Vakuumtechnik.



Angaben des amerikanischen Herstellers First Solar 1,60 Dollar pro Watt. Wie aber kann man ohne Vakuum eine CIGS-Schicht drucken? Hier musste Nanosolar nicht bei Null anfangen. Zwei kleine Firmen in der Nähe von Los Angeles – International Solar Electric, Inc. (ISET) und Unisun – hatten schon in den Neunzigerjahren einen Weg gefunden: mit winzigen Nanopartikeln aus Kupfer-, Indium- und Galliumoxid als Ausgangsmaterial. Die Oxidpartikel wurden in einer chemischen Lösung zu einer Art Tinte gemixt, die sich wie Druckfarbe auf ein Trägermaterial (Substrat) auftragen ließ.

Damit daraus das gewünschte sauerstofffreie CIGS entstand, musste die Schicht nach dem Trocknen einer Wasserstoff-Atmosphäre ausgesetzt werden: Der Wasserstoff verband sich mit dem Sauerstoff aus den Partikeln zu H_2O und verließ als Wasserdampf die gedruckte Schicht. Anschließend wurden die Partikel in einer Mischung aus Selenwasserstoff und Stickstoff bei 400 bis 500 Grad Celsius zu CIGS zusammengebacken. Mit einer so hergestellten, winzigen Labor-Solarzelle auf Glas erreichte Unisun einen Wirkungsgrad von 11,7 Prozent, ISET im Jahr 2004 sogar 13,7 Prozent.

Roscheisen holte sich die Kompetenz beider Firmen ins Haus: Er engagierte den ISET-Mitarbeiter Craig Leidlholm als leitenden Prozessingenieur, erwarb von Unisun die Patente und holte deren Firmengründer Chris Eberspacher gleich selbst an Bord. Die Mannschaft von Nanosolar, die inzwischen rund 50 Mitarbeiter umfasst, hat es nach Darstellung

ihres Chefs geschafft, einen wesentlichen Nachteil im Verfahren der beiden Pionierfirmen zu überwinden: Sie entwickelte Nanopartikel, die bereits vor dem Druckvorgang oxidfrei sind. So entfällt die Nachbehandlung mit Wasserstoff.

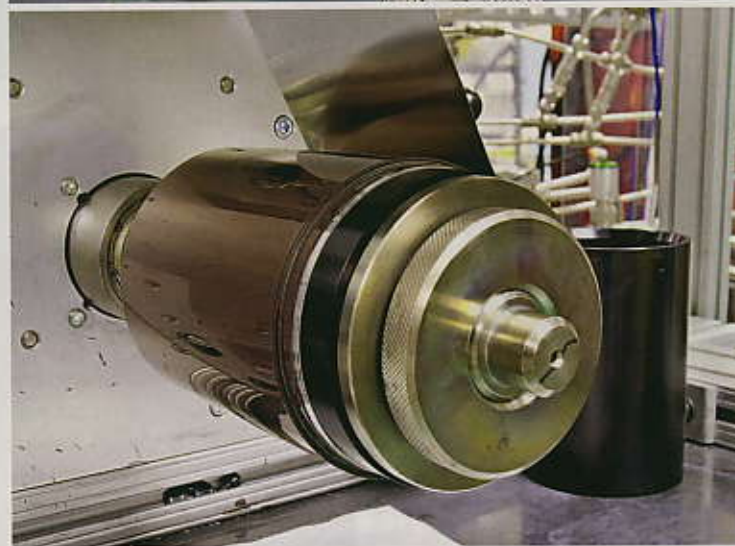
Das Unternehmen hat sich eine ganze Reihe von Methoden, wie man die oxid-

der schließlich die Partikel ausgefällt werden. Das definitive Rezept hält das Unternehmen natürlich unter Verschluss. Experte Eberspacher verrät nicht viel mehr als den grundsätzlichen Zweck: „Eine Schicht aus preiswerten Nanopartikeln erzeugen und in einen photovoltaischen Film von hoher Qualität umwandeln.“

Da die nach Kupfer, Indium und Gallium vierte Komponente von CIGS, das Selen, jetzt ebenfalls in Partikelform hinzugefügt wird, fällt auch die zuvor notwendige Behandlung mit dem hochgiftigen Selenwasserstoff weg. Stattdessen wird die Partikelschicht durch kurzzeitiges Erhitzen mit Heizlampen – im Fachjargon „rapid thermal processing“ genannt – gesintert. Dabei entweicht die Lösung, die die Drucktinte flüssig gehalten hatte, aus der Schicht.

Die Partikel des Ausgangsmaterials sind mit nur 10 bis 20 Nanometern bloß ein Zehntel so groß wie die Metalloxidteilchen, die die Firmen ISET und Unisun verwendet hatten. Das ermögliche eine höhere Packungsdichte, schnelleres Sintern und „sehr effiziente, großkörnige Solarzellen“, versichert Roscheisen. Je größer die Kristallkörner ausfallen, desto weniger Korngrenzen – und damit weniger Widerstand – müssen die Ladungsträger überwinden.

Die beim Sinterprozess zusammengewachsenen Körner verbessern also die elektrische Leitfähigkeit der Zelle. Außerdem, so Roscheisen, lasse sich das Verhältnis der einzelnen Elemente Kupfer, Indium, Gallium und Selen durch die Mengenanteile der Partikel sehr genau einstellen: „Die Reproduzierbarkeit ist in die Tinte eingebaut – ein Riesenvorteil.“



Nanosolar-Ingenieur Brian Gilberti testet hier im Technikumsmaßstab das Drucken der Nano-Tinte auf Aluminiumfolie (ganz oben). Darunter: Nach dem Beschichtungsvorgang wird die Folie wieder aufgewickelt.

freien Partikel herstellt, patentieren lassen. Sie können zum Beispiel durch Verdampfen der Metalle und anschließende Kondensation zu Kristallen gewonnen werden oder durch chemische Reaktionen von Metallsalzen oder metallorganischen Verbindungen in einer Lösung, aus

Als Trägermaterial für die CIGS-Schicht dient eine Aluminiumfolie. Laut Roscheisen ist diese Lösung 20-mal billiger als die gängige Edelstahlfolie.

Das National Renewable Energy Laboratory (NREL) ermittelte im Frühjahr 2005 für eine 0,5 Quadratzentimeter große gedruckte Testzelle von Nanosolar einen Wirkungsgrad von 9,7 Prozent; bei einer Messung des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) in Stuttgart stand eine 10 vor dem Komma. Inzwischen hat Nanosolar einen neuen Rekord erreicht: Für eine 0,47 Quadratzentimeter große gedruckte Zelle bescheinigte das NREL im August 2006 einen Wirkungsgrad von 13,95 Prozent.

Berücksichtigt man nur die aktive Fläche ohne die verschattenden Front-Kontaktfinger aus Metall, steigt der Wert laut Roscheisen sogar auf 14,6 Prozent. In der Serienproduktion will Nanosolar tatsächlich ohne solche Kontaktfinger auskommen. Eine Zelle im üblichen Produktionsformat von etwa Handtellergröße erreiche dann 12 bis 13 Prozent, sagt Roscheisen. Diese Zellen sollen zu 160-Watt-Modulen mit einem Modulwirkungsgrad von 10 Prozent verschaltet werden.

Marc Kälin, wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Dünnschichtphysik-Gruppe am Laboratorium für Festkörperphy-

sik der ETH Zürich, sieht für CIGS-Solarzellen aus Nanopartikeln sogar ein Potenzial von 15 bis 16 Prozent Wirkungsgrad – zumindest auf Glas. Auf diesem Substrat hat die Züricher Forschergruppe, ebenfalls aus oxidfreien Nanopartikeln, eine Testzelle hergestellt. Die Partikelpaste wurde mit einem Schabeisen (Rakel) auf das Glas aufgestrichen.

Das reichte allerdings vorerst nur zu 6,7 Prozent Wirkungsgrad – vor allem, weil die CIGS-Schicht nach dem Sintern noch zu dünn ausfiel, um genügend Sonnenlicht zu absorbieren. Die Schweizer Firma Solaronix, bislang Lieferant von Titandioxid und Ruthenium für Farbstoff-Solarzellen, will aber den Nanopartikel-Ansatz der ETH-Forscher weiterverfolgen: „Ich denke schon, dass dies eine echte Alternative zu den Vakuumverfahren ist“, sagt Firmenchef Toby Meyer.

Ein Riesenschritt ist es freilich von der Einzelanfertigung kleiner Testzellen bis zur Serienproduktion. Um bei Nanosolar die kommerzielle Herstellung gedruckter Solarzellen zu realisieren, hat Roscheisen schon im März 2005 einen erfahrenen Könnler angeheuert, dem an anderer Stelle das Hochskalieren einer industriellen Produktion gut gelungen ist: Werner Dumanski, ebenfalls gebürtiger

Deutscher, fuhr bei Hitachi/IBM die Herstellung von Schreib- und Leseköpfen für Festplattenlaufwerke von einzelnen Labor-exemplaren zu jährlichen Stückzahlen im dreistelligen Millionenbereich hoch.

Auch für die Finanzierung ist gesorgt. Nanosolar war nach eigenen Angaben die erste Photovoltaik-Firma, die Gelder von prominenten Risikokapitalgebern wie Benchmark Capital und Mohr Davidow Ventures einwerben konnte. In den ersten beiden Akquisitionsrunden kamen 26,5 Millionen Dollar zusammen. Die dritte, im Juni 2006 abgeschlossene Runde erbrachte durch die Ausgabe von Vorzugsaktien weitere 75,6 Millionen Dollar. Zu den neuen Investoren gehört unter anderem der Züricher Rückversicherer Swiss Re.

Ende 2006 gab Nanosolar bekannt, man werde in San Jose, südlich von San Francisco, eine große Fertigungsanlage für gedruckte Solarzellen aufbauen. Die jährliche Produktionskapazität soll im Endausbau 430 Megawatt erreichen. Für die Montage zu fertigen Modulen wird in Luckenwalde nahe Berlin eine Fabrik errichtet.

„2007 werden wir das erste Produkt haben“, sagt Roscheisen. Dünnschicht-experten halten dieses Ziel für äußerst ambitioniert. „Man darf das zumindest kritisch sehen“, meint zum Beispiel Michael Powalla. Er leitet am ZSW das Fachgebiet Materialforschung, das die Produktionstechnologie für Würth Solar entwickelt hat. Roscheisen lässt sich von solchen Stimmen nicht beirren. „Skeptiker gibt es immer“, sagt der Enthusiast. „Wir lassen uns am Produkt messen.“ ■

NANOSOLAR-KONKURRENTEN: NICHTS GEHT OHNE VAKUUM

DER ERSTE HERSTELLER von Dünnschicht-Solarmodulen aus Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) war 1998 Siemens Solar Industries im kalifornischen Camarillo. Die Fabrik, die 2002 von Shell Solar übernommen und im Frühjahr 2006 geschlossen wurde, etablierte das bisher am meisten genutzte Produktionsverfahren: Man bringt zunächst Kupfer, Indium und Gallium durch Kathodenzerstäubung (Sputtern) auf ein mit Molybdän beschichtetes Glassubstrat auf. Dabei werden die Metalle in so genannten Targets mit Ionen beschossen, wodurch Atome herausgeschleudert werden und sich auf dem Substrat niederschlagen. Anschließend scheidet man bei hohen Temperaturen Selen aus Selenwasserstoff ab. In

seinem Münchner Forschungszentrum hat Shell Solar inzwischen eine Alternative mit Selendampf entwickelt.

Der amerikanische Hersteller Global Solar erzeugt die CIGS-Schicht durch das gleichzeitige Aufdampfen aller vier Elemente auf eine Edelstahlfolie, Würth Solar verwendet Glas als Trägermaterial. Zwei weitere amerikanische Start-up-Unternehmen entwickeln CIGS-Zellen auf Folie durch reines Sputtern (Miasolé in Santa Clara, Kalifornien) oder durch schnelles Auftragen von Selen nach dem Sputtern (DayStar Technologies in Halfmoon, New York).

Eines haben alle diese Ansätze gemeinsam: Die Produktionsprozesse finden fast ausschließlich in Vakuumkammern statt.



JOHANNES BERNREUTER ist freier Fachjournalist in Würzburg. Arbeitsschwerpunkt: Analysen zur Markt- und Technologieentwicklung der Photovoltaik.



INTERNET

Die Webseiten von Nanosolar, Inc.:
www.nanosolar.com

Die Webseiten des Schweizer Unternehmens Solaronix S.A.:
www.solaronix.com