



# Grün, grün, grün ...

... sind alle Träume der Photovoltaikindustrie. Ihr neuer Leitbegriff **Triple Green** heißt: sauberen Strom erzeugen, Module recyceln und diese obendrein umweltfreundlich herstellen. Doch noch ist der Dreiklang eine Vision. Denn Ökofabriken erfordern hohe Anfangsinvestitionen.

Text: Sascha Rentzing und Jürgen Heup

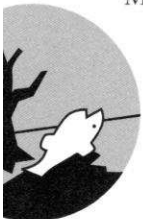
Diesmal stammt die Innovation nicht aus China oder den USA, sondern aus Osterweddingen in Sachsen-Anhalt: Die Firma Malibu, die in dem kleinen Ort bei Magdeburg Dünnschichtsiliziummodule fertigt, reinigt ihre Prozesskammern seit Anfang 2010 mit Fluor statt dem gefährlichen Treibhausgas Stickstofftrifluorid (NF<sub>3</sub>). Das klingt zunächst unspektakulär, bringt jedoch großen ökologischen Nutzen: „Wir vermeiden so jegliches Emissionsrisiko“, sagt Malibu-Fertigungsleiterin Antje Bönisch. NF<sub>3</sub> sei – falls es unbeabsichtigt in die Atmosphäre entfleuche – für die glo-

bale Erwärmung 17200-mal so gefährlich wie Kohlendioxid, Fluor habe dagegen kein Treibhauspotenzial. Wirklich attraktiv wird der Ökoschwenk für das Unternehmen aber durch die sinkenden Betriebskosten. „Wir sparen pro Jahr eine sechsstellige Summe“, sagt Bönisch. Dadurch gewinne Malibu im hart umkämpften Dünnschichtsegment an Wettbewerbskraft.

Der Schlüssel zu sauberer und kosteneffizienterer Fertigung ist ein so genannter Fluor-On-Site-Generator der Firma Linde, der direkt an die Versorgungsleitungen des Dünnschichtwerks angeschlossen ist. Malibus Module entstehen, indem Silizium in Vakuumkammern auf eine Glasscheibe auf-

gedampft wird. Da bei diesem Prozess viel Silizium an den Kammerwänden kleben bleibt, müssen diese nach jedem Beschichtungsprozess gereinigt werden. Der Generator leitet dafür Fluor ein, das mit dem Silizium zu Siliziumtetrafluorid reagiert, welches anschließend abgepumpt, abgefangen und abreagiert wird.

Der entscheidende Vorteil der neuen Methode ist neben der verringerten Klimagefahr die Schnelligkeit: Normalerweise betrage die Reinigungszeit mehr als zehn Prozent der gesamten Prozesszeit einer Vakuumkammer. Fluor reduziere sie dank seiner hohen Reaktionsfreudigkeit um die Hälfte, erklärt Andreas Weisheit, der bei Linde für die Ent-





## Kleine Stoffkunde der Photovoltaik

Mit Photovoltaik assoziiert man grüne Stromproduktion. Bei der Herstellung von Solarmodulen werden allerdings Stoffe verwendet, die rein gar nichts mit der Vorstellung von grüner Energiegewinnung zu tun haben: etwa Stickstofftri-fluorid, Phosphortrichlorid oder Salpetersäure. Nach diesen Chemikalien befragt, würde der Normalverbraucher wohl eher an die Kampfmittelproduktion denken als an die Regenerativbranche. Doch die Lastwagen, die je nach Größe der Solarfabrik im Stundentakt durch die Tore rollen, zeigen eindeutig, wo die Stoffe verwendet werden. Symbole auf den Wagen wie verätzte Hände, tote Fische oder – ganz drastisch – ein Totenkopf, warnen vor dem Inhalt der überdimensionalen Zigarrenbehälter auf den Ladeflächen: Da braucht der Laie nicht die Kemmler-Zahlen im Kopf zu haben, mit denen jede einzelne Chemikalie für Feuerwehr und Katastrophenschutz zusätzlich kenntlich gemacht ist, um zu wissen, dass in den Produktionsstätten von Solarzellen und Modulen höchste Vorsicht geboten ist.

Allerdings bedeutet die Nutzung von Gefahrstoffen nicht automatisch, dass die Umwelt oder die Gesundheit von Menschen in Mitleidenschaft gezogen wird. Das Stoffmanagement von Solarfabriken sei schließlich streng reguliert, betonen die Hersteller. Modernste Methoden der Aufbereitung und Neutralisierung der Chemikalien beziehungsweise Kreislaufsysteme sollen die Gefahrenpotenziale bannen. Das Beispiel Luoyang Zhonggui zeigt aber, dass es keine Garantien gibt, dafür aber immer noch schwarze Schafe: Der chinesische Siliziumhersteller verklappte 2008 ätzendes Siliziumtetrachlorid, ein Nebenprodukt der Siliziumherstellung, einfach auf die umliegenden Felder.

wicklung des Photovoltaik(PV)-Geschäfts zuständig ist. Das verbessert den Durchsatz der Linien und senkt Produktionskosten. Und für all dies hat Malibu keine hohen Anfangsinvestitionen zu schultern: Der Generator bleibt Lindes Eigentum, der Dünnschichtspezialist verpflichtet sich lediglich, das Fluor abzunehmen – zu einem Preis, der, so Fertigungsleiterin Bönisch, nicht über dem des angelieferten  $\text{NF}_3$  liege.

### Energieintensive Produktion

Malibu zählt damit zu den Vorreitern einer Branche, die nicht nur schnell, sondern auch sauber wachsen will. Bei ihren Bemühungen um Kostensenkungen dürften

die Hersteller nicht in Versuchung geraten, günstigere Lösungen anzuwenden, ohne deren Einfluss auf die langfristige Nachhaltigkeit zu berücksichtigen, betonte Anton Milner, Q-Cells-Chef und Vize-Präsident des Verbands der europäischen PV-Industrie Epia, auf dem Photovoltaics Fab Managers Forum 2007 in Leipzig.

Inzwischen existiert für Milners Ansatz ein einprägsamer Begriff: „Triple Green“ – Module erzeugen grünen Strom, werden nach Ablauf ihrer Lebenszeit recycelt und zudem ressourcenschonend produziert. Das heißt im Idealfall: In Werken, die mit Ökomaterialien gebaut und regenerativen Energiequellen versorgt werden, fallen

bei der Herstellung von Silizium, Wafern, Zellen und Modulen kaum noch Kohlendioxid und Abfälle an, sind Energie-, Gas-, Säure- und Wasserverbrauch auf ein Minimum reduziert.

Für die große grüne Motivation der Solarindustrie gibt es vor allem eine Erklärung: Ihr sauberes Image steht auf dem Spiel, denn sie wächst rasant und mithin ihr Ressourcenverbrauch und ihre Emissionen. Damit steuert sie auf die gleichen Probleme zu wie die Auto- oder Halbleiterindustrie, die beide viel Energie verschlingen. Seit Milners Appell 2007 haben sich der globale PV-Zubau auf etwa sechs und die Modulproduktion auf acht Gigawatt verdoppelt. Und das ►

## Trichlorsilan: ein heftiges Reagenz

Aus Sand, genauer aus Quarz oder Silikatmineralien wird durch Schmelz-, Reinigungs- und Destillationsprozesse hochreines Silizium hergestellt. Ein wichtiges Zwischenprodukt für die Solarindustrie ist dabei Trichlorsilan. In dieser Form wird das Silizium von den Produzenten zu den Waferfabriken transportiert. In Wasserstoff-Atmosphäre wird es dort thermisch zersetzt und wächst dabei auf Stäben langsam zu Solarsilizium. Trichlorsilan ist eine farblose, hochentzündliche Flüssigkeit, die einen stechenden Geruch verströmt. Bereits bei bloßem Kontakt mit der Luft kann es sich spontan entzünden. Wird sie erhitzt, entstehen giftige und ätzende Gase. Bei Kontakt mit Wasser bildet sich Salzsäure.

Wachstum soll, so die Prognosen, im gleichen Tempo weitergehen. Doch mit jedem neuen Werk steigt der Bedarf an Energie, gefährlichen Gasen und Säuren. Die Siliziumgewinnung ist, wie Eric Maier vom Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) betont, die „eigentliche Sauerei“: Der Weg vom Sand zum Solarsilizium führt über wenig umweltfreundliche Zwischenprodukte (siehe Kästen), beansprucht sehr hohe Temperaturen und frisst entsprechend viel Strom. Meist stammt dieser aus Atom- und fossilen Kraftwerken, denn herkömmlicher Strom ist für die Hersteller schlicht billiger und leichter verfügbar als regenerativ erzeugter.

Nicht viel ressourcenschonender werden anschließend die Wafer und Zellen gefertigt: Beim Sägen der Wafer aus den Siliziumblöcken geht fast die Hälfte des Siliziums verloren und muss – damit es wieder verwendet werden kann – erneut in die Schmelze. Zum Reinigen der Wafer nutzen Hersteller Säuren und Laugen. Zur elektrischen Ausrichtung der Zelle wird Phosphor und Bor eingebracht, und bei der elektrischen Verschaltung kommt schließlich Blei ins Spiel. All diese Chemikalien finden sich später in den Abwässern der Solarfabrik wieder. Diese werden zwar behandelt, dennoch gelangen Schadstoffe wie halogenierte Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle und Nitrate auch ins Kanalsystem.

### Zulieferer mit sauberen Lösungen

Auch bei der Dünnschichtproduktion benötigen Hersteller viel Energie und gefährliche Chemie. CIS- oder CdTe-Module werden bei hohen Temperaturen in langen Prozessen aus Kupfer, Indium, Selen, Cadmium und Schwefelwasserstoff oder Cadmiumtellurid gefertigt. Beim Dünnschichtsilizium

reinigen die Hersteller ihre Kammern bislang mit  $\text{NF}_3$ . So vorsichtig sie dabei auch agieren – ganz können sie das Treibhausgas nicht am Entfleuchen hindern. „17 Prozent gelangen während seines Produktlebenszyklus in die Atmosphäre“, sagt Linde-Manager Weisheit. Die Nachfrage der Dünnschichtproduzenten nach den Fluor-Generatoren sei deshalb groß. Malibu und Masdar PV haben bereits auf Fluor-Versorgung umgestellt, andere Firmen hätten dies vor, so Weisheit.

Die Solarhersteller können noch viel mehr tun, als ihren Gasanbieter zu wechseln: Die Zulieferer bieten ihnen diverse Möglichkeiten, ihre Produktion auf eine grüne Basis zu stellen. So offeriert die italienische Firma Saita Zellenfabrikanten neuerdings ein System, das 96 Prozent des Prozesswassers aufbereitet und es im Kreislauf zirkulieren lässt. Dadurch werde der Frischwasserbedarf der Zellenfertigung auf ein Fünfundzwanzigstel reduziert, erklärt Marketingmanager Carlo Enrico Martini. Außerdem gelange dank des Recyclings kein Abwasser in die Kanalisation. So helfe Saita Herstellern, ökologisch zu fertigen und zugleich Wasser- und Abwasserkosten zu sparen.

Der Berliner Fabrikplaner Ib Vogt legt noch ein Schippe drauf: Er hat eine so genannte „Greenfab“ entwickelt, die ökologisch gebaut und betrieben wird. Bis zu einem Gigawatt (GW) Solarleistung kann dort hergestellt werden. Je nachdem, was produziert werden soll – waferbasierte PV-Technik oder Dünnschichtpaneele –, können die Werke aus zwei bis drei Linien oder einem Cluster von zehn Straßen bestehen. Die nötige Energie, erklärt Projektmanager Lino Garcia, erzeugen Solar- oder Erdwärmeanlagen vor Ort. Abwärme dient zum Heizen und Kühlen, etwa um die Luft in Reinräumen konstant auf 19 bis 22 Grad

### Nasschemikalien: sauber, aber ätzend

Wafer und Zelle durchwandern auf ihrem Produktionsweg zahlreiche Ätz- und Reinigungsbäder. Darin schwimmen die so genannten Nasschemikalien. Die Hersteller verwenden dafür Fluss- Salz- und Salpetersäure sowie Wasserstoffperoxid aus dem unteren pH-Wert-Spektrum, Natron- und Kalilauge sowie Ammoniak aus der Basenfraktion: Diese hochkonzentrierten Säuren und Basen sind gesundheits- und umweltgefährdend. Sie verlangen den Herstellern eine hohe Prozesssicherheit ab. Bei der Aufbereitung erschöpfter Ätzlösungen und bei der Neutralisation entstehen unterschiedlich hohe Abwassermengen. Ein komplett geschlossener Abwasserkreislauf wäre aus ökologischer Sicht ideal, ist aber noch nicht realisiert.

Celsius zu halten. Weniger Schmutzwasser gelangt in die Kanalisation, da ein Großteil wiedergewonnen wird. Integrierte Logistik- und Transportkonzepte verkürzen Wege und steigern zusätzlich die Energieeffizienz. So kann die Solarindustrie mit der Greenfab große Mengen PV-Technik zugleich effizient und sauber fertigen.

#### Keine Ökorevolution

Doch so groß die Vorteile einer grünen Produktion sind – eine Ökorevolution ist in der Solarindustrie vorerst nicht in Sicht. Obwohl bereits vor drei Jahren entwickelt, hat Ib Vogt laut Garcia noch keine einzige komplette Greenfab verkauft, sondern immer nur einzelne, ökologisch besonders kritische Bestandteile der Fertigung wie etwa

Konzepte fürs Abwasserrecycling. Die grüne Solarfabrik ist ein Ladenhüter. „Die PV ist im Gegensatz zur Chipindustrie noch nicht tief ins Green Manufacturing eingestiegen“, sagt Carlos Lee vom Halbleiterverband Semi.

Doch was hemmt den Durchbruch von Triple Green in der Solarbranche? Ein entscheidender Aspekt sind die hohen Investitionskosten. So sei zum Beispiel eine Greenfab mit einem GW Kapazität im Schnitt 20 bis 30 Prozent teurer als eine normale GW-Fabrik, erklärt Garcia. Durch Energie- und Rohstoffersparnisse mache sich eine Investition zwar irgendwann bezahlt, wann genau, habe Ib Vogt aber nicht kalkuliert. Das Pro-



blem: Wer viele Millionen Euro investiert, muss den Zeitpunkt für den Return of Investment exakt kennen. Nach zehn Jahren käme dieser wahrschein-

lich zu spät, da bei dem hohen

Innovationstempo der Photovoltaik Fab-Design und -Interieur wohl längst veraltet wären. Das grüne Werk wäre also abrisssreif, bevor es Gewinn abwirft.

Zudem bremst die Rezession grüne Investitionen. Viele Hersteller mussten ihre Produktion drosseln, Einbußen bei Umsatz und Gewinn hinnehmen. „In dieser Phase können sich die Unternehmen keine großen Ausgaben leisten“, sagt Kevin Reddig vom



**Nachbarschaftshilfe:** Die Firma Linde (vorne im Bild) beliefert den Modulproduzenten Malibu (hinten) über eine direkte Gasleitung mit Fluor.

## Stickstofftrifluorid und Fluor: statt Klimagas ein giftiger Reiniger

Mit der Plasma-unterstützten chemischen Gasphasenabscheidung, die in den PECVD-Reaktoren abläuft, wird bei der Dünnschichtproduktion amorphes Silizium auf Glasscheiben gedampft. Stickstofftrifluorid dient dabei zur anschließenden Reinigung der Reaktoren. Gelangt es in die Atmosphäre, wirkt es als Treibhausgas 17200-mal stärker als Kohlendioxid. Messungen im Jahr 2008 ergaben, dass es heutzutage bereits in vierfach höhere Konzentration vorkommt als noch vor 30 Jahren. Nach diesen Untersuchungen entweichen 17 Prozent des produzierten Stickstofftrifluorids während des Produktzyklus. Als alternatives Reinigungsmittel für die Reaktoren wird mittlerweile auch Fluor eingesetzt. Es ist klimaneutral, aber deshalb noch lange nicht harmlos: Molekulares Fluor zählt zu den giftigen Nichtmetallen und ist das reaktivste Mitglied seiner Gruppe.



Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung in Stuttgart. So ist es mit der Einführung grüner Herstellertechniken und -prozesse derzeit ähnlich wie mit der Umsetzung neuer Zellenkonzepte: Die Kommerzialisierung komplexer,

nur mit hohem finanziellen Aufwand umsetzbarer Ansätze wie etwa der Rückkontaktzelle wird zurückgestellt.

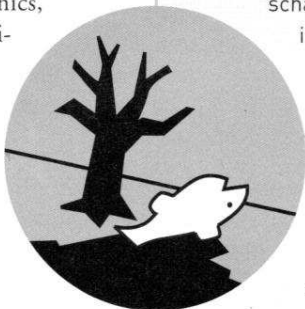
Stattdessen besinnen sich die Hersteller auf die günstigere Optimierung der Standardzelle, begnügen sich mit moderaten Effizienzgewinnen. Weil grün teuer ist, die Wirtschaftlichkeit unklar bleibt und die

Branche sparen muss, wird es also keinen plötzlichen Durchbruch von Triple Green geben. „Grün kommt in Dosen“, sagt Maier vom VDMA. Wichtig sei es, erst mal Standards für eine Greenfab festzulegen, betont Klaus Eberhardt vom Fabrikplaner M und W Group. Noch stehe nicht fest, welche Aspekte eine grüne Fabrik überhaupt ausmachen. „Wir sind dabei, Punkte zu definieren.“ Lee von Semi verweist auf die Entwicklung der Halbleiterindustrie, die ihren Verbrauch erst über die Jahre deutlich gesenkt hat. ST Microelectronics, der größte europäische Halbleiterhersteller, benötigte nach eigenen Angaben von 1994 bis 2009, um seine CO<sub>2</sub>-Emissionen um 65, seinen Energieverbrauch um 54, seinen Wasserbedarf um 70 und sein Abfallaufkommen um 71 Prozent zu senken.

Die Solarbranche steht heute da, wo die Chipindustrie vor 15 Jahren stand. Solarworld baut keine Greenfab, sondern macht in seinem Nachhaltigkeitsbericht zunächst nur alle relevanten Um-

## Cadmium: Puffer, Halbleiter und toxischer Gesell

„Sehr giftig“, in diese Kategorie stuft die Weltgesundheitsbehörde (WHO) Cadmium ein. Es befindet sich damit in derselben Gefahrengruppe wie Quecksilber und Uran. Cadmium ist ein Bergbauebenprodukt. Laut einer Studie der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) aus dem Jahr 2009 hält das Schwermetall schleichend Einzug in unsere Nahrungsmittel. In Solarzellen wird es in der kristallinen Verbindung Cadmiumtellurid (CdTe) verwendet, die Halbleitereigenschaften aufweist. Als Cadmiumsulfid (CdS) dient es als Puffer zwischen den positiven und negativen Schichten kupferbasierter Solarzellen. Obwohl dort gut verpackt, diffundiert es, entflucht langsam aus den CdTe- als auch aus den CIS-Modulen. Nach Einschätzung der EU-Kommission wiegen die ökologischen Vorteile von CdTe in der Photovoltaik die „geringfügigen ökologischen Auswirkungen“ auf. Denn so würden fossile Brennstoffe ersetzt, die 100- bis 360-mal mehr Cadmium in die Luft emittieren.



weltdaten von sich und seiner Vorlieferanten transparent, ebnet grünen Investitionen also erst den Weg. Modulhersteller Solon ebenso: Er hat 200 000 Euro in ein Umweltmanagementsystem nach ISO 14001 investiert, um einen Überblick

zu erhalten, wo nachhaltige Lösungen überhaupt wirtschaftlich sinnvoll sind. Malibu schwenkt in einem ersten wichtigen nachhaltigen Schritt von NF<sub>3</sub> auf Fluor um. Eine Maßnahme mit Kostenvorteilen. Sonst hätte das Unternehmen wohl weiter mit Stickstoff gearbeitet. ◀