



Auf Sonnenkurs: Vergangenen Sommer absolvierte das solar-getriebene Flugzeug Solar Impulse des Schweizer Abenteurers Bertrand Piccard seinen ersten Testflug über Payerne.

# HÖHENFLUG BEIM WIRKUNGSGRAD

Klassische Silizium-Solarzellen sind immer noch die verbreitetsten Sonnenlichtfänger fürs Hausdach. Weiterentwickelte Silizium-Module halten die konkurrierenden Ansätze auf Abstand.

VON SASCHA RENTZING

**D**ie Schweizer Luftwaffe hat ihre Pilatus-Flugzeuge bereits verlegt. Denn die Ingenieure des Solar-Impulse-Projekts der beiden Schweizer Elektroflug-Pioniere Bertrand Piccard und André Borschberg brauchen Platz, viel Platz. Bald wollen sie im Hangar des Militärflugplatzes Payerne südlich von Bern mit der Konstruktion des neuen, verbesserten Solarfliegers beginnen. Die Maschine wird mit 80 Metern Spannweite an den Airbus A380 heranreichen, das weltweit größte Verkehrsflugzeug. Im Jahr 2012 soll das E-Flug-

gerät dann zu einer Reise abheben, die Luftfahrtgeschichte schreiben könnte: der Weltumrundung ohne Treibstoff und ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Ein Ereignis, das Vorbildcharakter haben könnte. „Der Kohlendioxid-Ausstoß aus dem Luftverkehr soll bis 2050 um die Hälfte sinken. Warum nicht mithilfe solarer Passagierflugzeuge?“, sagt Projekt-Initiator Bertrand Piccard. Flugzeuge und Schiffe, die emissionsfrei mit Brennstoff- oder Solarzellen angetrieben werden, sind längst mehr als eine kühne Vision. Ende Mai 2011 wird der Schweizer Raphaël Domjan mit seinem

Fotos: dpa/EPA/Christian Hartmann, Rainer Weisflog

solarbetriebenen Katamaran Türanor PlanetSolar nach achtmonatiger Weltumrundung in Monaco zurückerwartet.

Bereits im Juli 2010 gelang Solar-Impulse-Pilot André Borschberg mit dem ersten Prototyp ein 26-Stunden-Flug über Payerne. Vier Elektromotoren mit 30 Kilowatt (kW) Gesamtleistung hieften das 1,5 Tonnen schwere Gerät auf 8500 Meter Höhe. Danach trieben 12 000 in die Flügel integrierte monokristalline Rückseitenkontaktzellen der US-Firma SunPower mit 22,5 Prozent Wirkungsgrad die Propeller an. SunPower-Solarzellen fangen mehr Licht ein und sind effizienter als herkömmliche Siliziumzellen, da sich ihre Stromanschlüsse auf der Rückseite befinden, sodass die Front nicht von Kontakten verschattet wird.

Die neue Solar Impulse soll für die Weltumrundung noch effizientere Solartechnik nutzen. Piccard will Mehrschichtenzellen einbauen, die, anders als Siliziumzellen, aus verschiedenen Schichten unterschiedlich legierter Halbleiter bestehen. Da sie jeweils eine andere Wellenlänge des Lichts nutzen, steigt ihr Wirkungsgrad auf 30 Prozent.

High-End-Zellen in mobilen Anwendungen sind die Speerspitze der Photovoltaik (PV) und unterscheiden sich noch stark von den stationären Modellen. Mobile Zellen müssen auf höchste Stromausbeute bei geringstem Gewicht gezüchtet werden. Die neuen Mehrschichtenzellen von Solar Impulse sollen deshalb nicht dicker sein als 50 Mikrometer. Einem Solaranlagenbetreiber kann die Dicke seiner Zellen hingegen relativ egal sein. Er kommt problemlos mit den 180 Mikrometern gängiger Siliziumzellen zurecht.

Dennoch sind die schlanken Hocheffizienzzellen auch für stationäre Anwendungen richtungweisend. Denn hohe Zellenproduktionskosten machen Sonnenenergie teuer: In Deutschland produzieren PV-Systeme Solarstrom nach Berechnungen der Fachzeitschrift „Photon“ für durchschnittlich elf Cent pro Kilowattstunde (kWh). Damit ist er viermal teurer als Kohlestrom. Bessere Wirkungsgrade können den Preis erheblich drücken. Der Wirkungsgrad beeinflusst die Wirtschaftlichkeit der Zellenproduktion stärker als jeder andere Faktor: Jeder Prozentpunkt mehr Wirkungsgrad, so die Faustformel, senkt die Kosten um sieben Prozent, da pro Watt weniger Material benötigt wird.

**Nicht alles, was** in den prototypischen Vorreitern mit einem hohen Wirkungsgrad glänzt, lässt sich jedoch in der Massenfertigung mit vertretbarem Aufwand realisieren. Bei den Mehrschichtenzellen wird eine Germaniumscheibe im Vakuum mit verschiedenen Absorbieren beschichtet. „Dieses Verfahren ist für großflächige terrestrische Anwendungen zu teuer“, sagt Gerald Siefer, Stapelzell-Experte am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg. Siliziumzellen lassen sich leichter umsetzen. ISE-Chef Eicke Weber glaubt, dass ihre Effizienz bereits mit relativ geringem Aufwand auf deutlich über 20 Prozent wachsen könne; derzeit verfügbare Standardzellen kommen auf durchschnittlich 17 Prozent.

SunPowers Rückseitenkontaktzellen, die in Tests bereits rekordverdächtige 24,2 Prozent Wirkungsgrad erreichen, geben die Richtung

vor. Ihr Nachteil sind jedoch die hohen Kosten, bedingt durch eine aufwendige Produktion. Statt auf revolutionäre Effizienzsprünge setzten die meisten Hersteller daher auf kosteneffizientere evolutionäre Entwicklungen ihrer Siliziumzellen, erklärt Paul Wyers, Leiter des Bereichs Solarenergie am niederländischen Energieforschungsinstitut ECN.

**Nach zwei Jahrzehnten** intensiver Siliziumforschung haben die Labore der Industrie inzwischen eine Reihe verschiedener Optimierungsverfahren entwickelt, um erstens mit geringstem Aufwand möglichst viel Licht einzufangen und zweitens Ladungsträgerverluste in der Zelle zu vermeiden. Strom fließt nur dann, wenn die negativ geladenen Elektronen die Kontakte auf der Vorderseite und die positiv geladenen Freistellen, die durch das Abwandern der Elektronen entstehen – die sogenannten Elektronenlöcher –, den Rückkontakt erreichen. Die größten Verluste entstehen dadurch, dass sich Elektronen und Löcher an Stellen mit Unregelmäßigkeiten im Halbleiterkristall oder an dessen Oberfläche wieder neutralisieren, im Fachjargon: rekombinieren.

Die chinesischen Hersteller Suntech Power und Yingli Green Energy lösen dieses Problem derzeit am besten. Suntech hat gemeinsam mit der University of New South Wales in Sydney Zellen entwickelt, die 10 bis 15 Prozent effizienter sind als seine bisherigen Zellen – die monokristalline Variante erreicht 19,2 Prozent Wirkungsgrad. Ein Geheimnis von Suntech ist der selektive Emitter. Das ist die obere aktive Schicht des Siliziumkristalls. Sie wird gezielt mit Phosphor verunreinigt. Je mehr Phosphor sie enthält, desto besser leitet sie die generierten Elektronen aus der Zelle zu den Kontakten, da sich durch die Phosphoratome der Übertragungswiderstand zwischen dem Halbleiter und den Kontakten verringert. Zu viel Phosphor ist aber schlecht für den Wirkungsgrad. Denn die Phosphoratome wirken wie Störungen in der Kristallstruktur, an denen sich die erzeugten Ladungsträger wieder rekombinieren, ehe sie die

Saubere Sache: Mitarbeiter des Photovoltaik-Spezialisten Deutsche Cell überwachen, wie Roboter mit Solarzellen aus hochreinem, monokristallinem Silizium hantieren.





Kontakte erreichen. Suntech arbeitet daher nur direkt unter den Kontakten mit viel Phosphor, dazwischen mit weniger. So verbessere sich die Effizienz bei nahezu gleichbleibenden Prozesskosten, sagt Technikchef Stuart Wenham.

**Yingli wiederum will** den Wirkungsgrad seiner Zellen mittels eines speziellen monokristallinen n-Typ-Siliziums und sogenannter „Metal-Wrap-Through“-Technik (MWT) auf 20 Prozent steigern. Siliziumzellen bestehen aus zwei unterschiedlich dicken Bereichen, die sich in ihrer Leitfähigkeit unterscheiden. In Standardzellen ist die dickere untere Schicht mit Bor angereichert, um einen Überschuss positiver Ladungsträger zu erhalten, im oberen Emitter sorgt dagegen Phosphor für einen Überschuss negativer Ladungsträger. n-Typ-Zellen sind genau umgekehrt aufgebaut (siehe Grafik). Ihr Vorteil: Wegen seiner speziellen Atomeigenschaften neigt Bor weniger dazu, die generierten Ladungsträger zum Rekombinieren zu bringen, weshalb die Zellen einen höheren Wirkungsgrad erreichen. Das wiederum macht es möglich, mit billigerem Silizium zu arbeiten, das mehr Verunreinigungen enthält, oder Zellen mit höheren Effizienzen herzustellen.

Das MWT-Konzept setzt Yingli über die Anordnung der Stromsammelschienen um: Um den Schattenwurf zu verringern, verlegt es die Schienen, die für die Verschaltung der einzelnen Zellen nötig sind, auf die Rückseite und verbindet sie über winzige Löcher mit den Metallkontakten auf der Front.

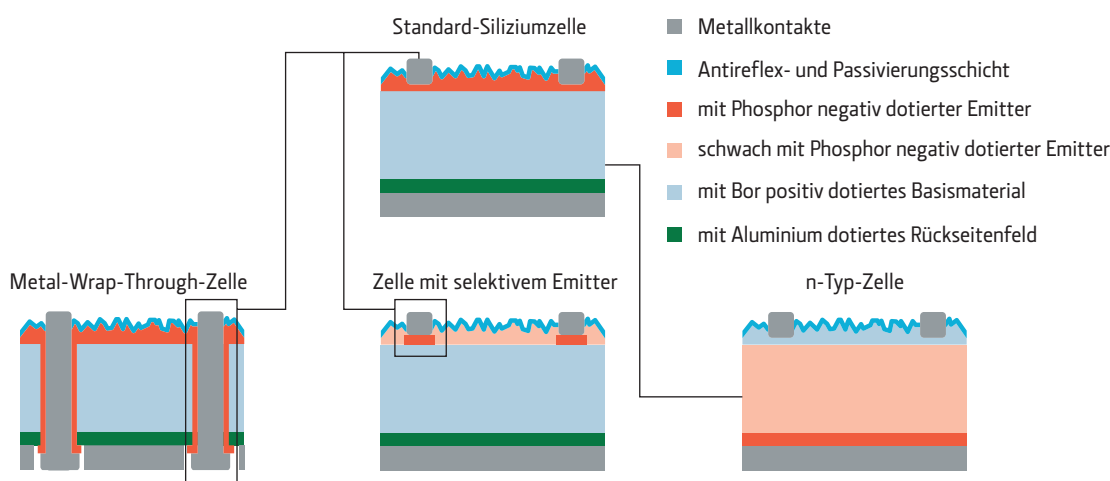
MWT-Zellen gelten als Vorstufe der Rückseitenkontaktzellen, die für einen maximalen Lichteinfall die gesamte Metallisierung, also auch die Kontakte, auf ihrem Rücken tragen (siehe Grafik).

Um technologisch nicht abgehängt zu werden, ziehen die deutschen Hersteller mit Innovationen nach. Auch Bosch Solar Energy und Schott Solar wollen MWT-Zellen produzieren. Q-Cells hingegen hat die Rückseite seiner multikristallinen Zellen so optimiert, dass die Effizienz gegenüber bisherigen Q-Cells-Standardzellen um 1,5 Prozentpunkte auf 18,5 Prozent steigt. Spezielle Antireflex- und Passivierungsschichten minimierten Lichtreflexionen und Ladungsträgerverluste, erklärt Cheftechnologe Peter Wawer.

Bei dem Innovationstempo der Silizium-Wafer-Technik können andere PV-Varianten wie die Dünnschichtsysteme kaum noch mithalten. Aufgekommen zu Zeiten des Siliziumengpasses im Jahr 2007, sollten sie die teuren kristallinen Module als führende Solartechnik ablösen. Siliziumzellen, so das Argument, nutzten bei 180 bis 250 Mikrometern Dicke nur 20 Mikrometer für die Lichtumwandlung, das restliche Material diene der Stabilität der Zelle. Warum also nicht für den gleichen Effekt auf das teure Silizium verzichten? Immer mehr Firmen ersetzen deshalb die dicken Wafer durch billige Glasscheiben, die sie mit hauchdünnen halbleitenden Schichten überzogen.

Der große Durchbruch der Dünnschicht blieb dennoch aus. Zum einen war Silizium dank rascher Produktionsweiterun-

## Leistungsfähige Lichtfänger



**Standard-Siliziumzelle:** 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, bleibt eine positive Ladung zurück, die sich zur Metallfläche auf der Rückseite bewegt. Eine Passivierungsschicht verhindert Ladungsträgerverluste.

**Metal-Wrap-Through-Zelle:** Sie erlaubt, Stromsammelschienen einzusparen, indem alle Schienen auf die Rückseite der Zelle verlegt werden. Dadurch reduzieren sich die Abschattungsverluste auf der Vorderseite. Laserbohrte Löcher verbinden die Schienen mit den Frontkontakten.

**Zelle mit selektivem Emitter:** Unter den Kontakten wird die Ladungsträger sammelnde Schicht stark, dazwischen dagegen nur schwach mit Phosphor angereichert. Das reduziert die Phosphor-bedingten Störstellen und erhöht die Stromausbeute.

**n-Typ-Zelle:** Sie ist genau umgekehrt wie eine Standardzelle aufgebaut: Das dicke Basismaterial wird statt mit Bor mit Phosphor versetzt und somit negativ leitfähig, die Vorderseite hingegen wird statt mit Phosphor gezielt mit Bor angereichert, um einen Überschuss positiver Ladungsträger zu erhalten. Der neuartige Bor-Emitter erhöht die Stromausbeute.

gen der Chemiekonzerne bald wieder reichlich und billiger verfügbar, zum anderen kann die Dünnschichttechnik nach wie vor nur mit relativ geringen Effizienzen aufwarten. Mit Zellen auf Basis von Kupfer, Indium und Selen (CIS) erreicht etwa das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) 20,3 Prozent Wirkungsgrad. Industriell gefertigte CIS-Zellen sind aber noch weit von solchen Werten entfernt, und in der Produktion sind sie mit geschätzten zwei Euro pro Watt auch noch doppelt so teuer wie manche Siliziumzellen. „Für CIS existieren bisher zu kleine Produktionseinheiten“, erklärt ZSW-Vorstand Michael Powalla. Steigende Preise für die begehrten Rohstoffe Indium und Gallium könnten das Problem noch verschärfen.

Anders sieht es bei Dünnschichtzellen aus Cadmiumtellurid (CdTe) aus. Zwar erreichen Module des Marktführers First Solar nur rund elf Prozent Effizienz, aber bei Produktionskosten von lediglich 50 Cent pro Watt kann er seine Technik billiger anbieten als die Hersteller von CIS- und Siliziumpaneelen. Offenbar verzeihen es Betreiber daher, dass CdTe-Module wegen ihres geringeren Wirkungsgrads für die gleiche Leistung mehr Fläche benötigen: Pro Jahr verkauft First Solar mehr als 1000 Megawatt (MW) Leistung. Allerdings gerät die Technik wegen des giftigen Cadmiums immer stärker in die Kritik. Selbst führende Solarforscher fordern inzwischen ihr Verbot.

Für Nanosolar-Zellen sind die Chancen auf einen Platz an der Sonne noch geringer. Die US-Firma Nanosolar hatte bereits für 2009 revolutionäre Technik angekündigt: Zellen aus Aluminiumfolien, auf die ein CIS-Halbleiter im Rotationsverfahren gedruckt wird, sollten mit Effizienzen von elf Prozent und Fertigungskosten von nur 30 Cent alle anderen PV-Techniken in den Schatten stellen. Die geplante Massenproduktion läuft wegen technischer Probleme jedoch bis heute nicht.

Auch die Kommerzialisierung von Farbstoff- und organischen Zellen stockt. Größtes Problem ist, dass die Zellen schon nach wenigen Wochen deutlich an Leistung verlieren, da sich ihre photoaktiven Substanzen zu schnell abbauen.

**Mit lichtbündelnden Systemen** hingegen etabliert sich derzeit eine Technik, die bisher keiner auf der Rechnung hatte. Dabei konzentrieren integrierte Spiegel oder Linsen Licht auf winzige Mehrschichtzellen. Durch die 500- bis 1000-fache Verstärkung der Strahlung werde eine teure großflächige Anwendung der Mehrschichtzellen vermieden, erklärt ISE-Forscher Siefer.

Die Solar Energy Business Unit des französischen Halbleiterzulieferers Soitec hat ein solches System mit 25 Prozent Wirkungsgrad entwickelt. Das Unternehmen bringt 98 Mehrschichtzellen mit drei Millimeter Durchmesser in einem Modul mit rund einem Drittel Quadratmeter Größe unter. Dann werden 90 dieser Paneele wiederum auf eine 30 Quadratmeter große Nachführeinheit, den Tracker, montiert, der die Anlage nach dem Sonnenstand ausrichtet. „An guten Standorten können die Konzentratorsysteme schon heute 20 bis 30 Prozent kostengünstiger Strom erzeugen als herkömmliche Module“, sagt Siefer.

Allerdings erhöht die Nachführung die Kosten und ist bei Dachanlagen kaum möglich. Experten sehen die Systeme aber als eine Technologie, die in einstrahlungsreichen Regionen der Erde konventionelle Kraftwerke ersetzen könnte. Vor allem US-

Energieversorger zeigten großes Interesse, sagt Arnulf Jäger-Waldau vom Joint Research Centre der EU-Kommission, der einen Anstieg der global installierten Konzentration-Leistung von derzeit 100 bis 2015 auf 2000 Megawatt voraussagt.

Dennoch bleiben Konzentratoren damit eine Nischenanwendung. 2010 wurden global rund 15 000 MW Siliziumzellen installiert, 2015 soll ihr Zubau laut Prognosen bereits 50 000 MW betragen. Ihre Langzeitstabilität stehe außer Frage, und ihr Entwicklungspotenzial sei noch groß, erklärt ISE-Chef Weber.

**Eine weitere Hocheffizienz-Option** ist die von Sanyo entwickelte HIT-Zelle (Heterojunction with Intrinsic Thin layer), die aus monokristallinem Silizium besteht, das von beiden Seiten mit amorphem, also vollkommen unregelmäßig strukturiertem Silizium beschichtet wird. Auf der Frontseite dient es als Emitter, auf der Rückseite als Passivierschicht: Sie wirkt für Elektronen als Barriere. Deren Gegenstücke, die Elektronenlöcher, fließen indes ungehindert zu den Elektroden ab und können nicht mehr rekombinieren. So steigt die Effizienz auf 21,1 Prozent.

Während sich die Wirkungsgrade noch erheblich steigern lassen, kann der Materialverbrauch gleichzeitig deutlich sinken. Hersteller arbeiten an dünneren Siliziumscheiben und erproben Verfahren für sogenanntes direkt gereinigtes metallurgisches Silizium. Anders als Standardsilizium wird es nicht in aufwendigen Destillationsprozessen gewonnen, sondern durch mehrfaches Schmelzen gerade nur so weit gereinigt, dass es halbleitend wird. Das spart Kosten und hilft der PV ebenfalls, rasch wettbewerbsfähig zu werden. ❖

## Solarglossar

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

**Multikristallines Silizium:** Ist weniger hochwertig als monokristallines Silizium. Es wird in Blöcke gegossen und in Scheiben zerteilt. Beim Abkühlen bilden sich unterschiedlich große Kristallstrukturen, an deren Kanten Defekte auftreten, die niedrigere Effizienzen zur Folge haben.

**Amorphes Silizium:** Hat überhaupt keine geordnete Kristallstruktur.

**Dünnschichtzellen:** Kommen ohne das aufwendige Zerschneiden von Siliziumblöcken in Wafer aus. Die photoaktiven Schichten werden direkt auf Glas, Blech oder Kunststoff aufgetragen. Sie können aus hauchfeinen Siliziumschichten, Cadmiumtellurid (CdTe) oder Kupfer, Indium, Gallium, Selen oder Schwefel (CIS) bestehen.

**Emitter:** Heißt die gezielt mit Phosphor angereicherte Vorderseite des Siliziumkristalls, die in der Zelle generierte Ladungsträger sammelt und zu den Frontkontakten leitet.