

Photovoltaik – ein Fall für das Elektrohandwerk

Grundlagen – Zellentypen – Modultechnik

Die Photovoltaik ist von der Technologie her eindeutig ein Fall für das Elektrohandwerk (vgl. ep 8/2006, S. 593). Der boomende Markt in diesem Segment der erneuerbaren Energien bietet mit enormen Wachstumszahlen zusätzliche Umsatzmöglichkeiten.

1 Markt mit einem enormen Umsatzpotential

Die fossilen Energieträger Öl, Kohle und Gas haben zwei wesentliche Nachteile: Sie sind nicht unendlich verfügbar und ihre Verbrennung erzeugt klimaschädliche Emissionen – mit erheblichen Folgeschäden und -kosten. Auch Uran ist endlich. Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist darum nicht nur sinnvoll, sondern gesamtwirtschaftlich auch vorteilhaft. Mit ihrer Nutzung konnte im Jahr 2005 in Deutschland die Freisetzung von rund 83 Mio. t des klimaschädlichen Kohlendioxids (CO_2) vermieden werden. Deutschland und die EU, aber auch außereuropäische Länder wollen den Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung deshalb kräftig ausbauen.

Die Umsatzprognosen sind blendend: Wie der Bundesverband Solarwirtschaft mitteilte, zählt Deutschland mehr als 3500 Solarunternehmen, davon rund 50 Produzenten. Sie konnten im Jahre 2005 einen Umsatz von rund 3 Mrd. Euro erzielen, der bis zum Jahr 2020 auf mehr als 15,2 Mrd. Euro steigen soll. Auch die Vorhersage hinsichtlich der Entwicklung der Beschäftigtenzahl (von 25000 im Jahr 2005 auf 150000 im Jahr 2020) kennt nur eine Richtung – steil nach oben. Ähnliches gilt für die Stromerzeugung: Betrug sie im Jahr 2000 noch 38 GWh, so stieg sie bis Ende 2005 auf 1002 GWh, bei 200000 installierten Anlagen. Der Verband der Netzbetreiber (VDN) sagt einen Anstieg auf 2900 GWh im Jahre 2011 voraus.

Angesichts dieser Zahlen kann ein Elektrohandwerksunternehmer seine Chancen in diesem Geschäftsfeld kaum überschätzen. Um diesen relativ jungen Markt erfolgreich erschließen zu können, muss er sich jedoch aktiv engagieren. Er muss den Kunden kompetent beraten und davon überzeugen können, dass sich die Nutzung der Sonnenenergie heute schon lohnt. Deshalb ist es äußerst wichtig, sich das erforderliche Wissen durch Weiterbildung rechtzeitig anzueignen, es ständig zu erweitern und immer wieder aufzufrischen. Dass dieses Wissen nur lückenhaft vorhanden ist, zeigt eine Umfrage unter Handwerksbetrießen. Danach schätzen deutlich mehr als 60 % der befragten Unternehmer ihre Kenntnisse in Bezug auf regenerative Energien als gering

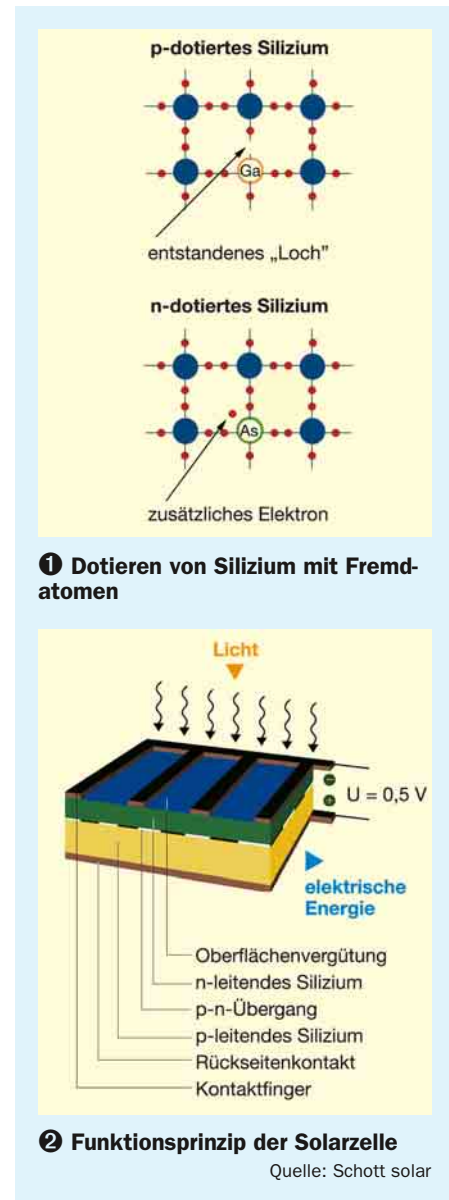
oder gar als unzureichend ein. Auch die Einschätzung hinsichtlich der eigenen Marktchancen ergab ein wenig positives Bild. Offensichtlich besteht hier ein sehr hoher Weiterbildungs- und Informationsbedarf. Viele Handwerkskammern haben das erkannt und bieten entsprechende Seminare an oder animieren ihre Mitgliedsbetriebe beispielsweise dazu, über eine Kooperationsbörse geeignete Partner für eine Zusammenarbeit zu finden (siehe www.handwerk-nrw.de).

2 Umwandlung von Licht in Strom

In der Photovoltaik vollzieht sich die Umwandlung von Sonnenstrahlung in elektrischen Gleichstrom in Solarzellen. Die heute gängigsten Ausführungen bestehen aus etwa 300 μm (= 0,3 mm) dicken Scheiben aus hochreinem Silizium mit einem flächigen Kontakt auf der Rückseite und einem fingerförmigen auf der Frontseite.

Silizium zählt zu den Halbleitern. In ihrem Inneren stehen nur wenige Elektronen für einen Stromtransport zur Verfügung. Die Ursache liegt im kristallinen Aufbau: Silizium hat 14 Elektronen, die in drei Elektronenschalen angeordnet sind. Vier davon, die so genannten Valenzelektronen, befinden sich in der äußeren Schale, dem Valenzband. Sie sind mit den Valenzelektronen benachbarter Silizium-Atome fest verbunden. Bei Energiezufuhr durch Wärme oder Licht können sich einige Elektronen aus den Valenzbändern lösen und im Kristallgitter frei vagabundieren. Sie hinterlassen dabei eine Lücke, eine (virtuelle) positive Ladung, die als „Loch“ bezeichnet wird. Reines Silizium besitzt also gleich viele positive wie negative Ladungsträger, wenn auch in geringer Menge.

Will man die Leitfähigkeit des Siliziums verbessern, muss man es gezielt mit Fremdatomen verunreinigen. Zum „Dotieren“ – so nennt sich dieser technische Vorgang – eignen sich Stoffe mit drei (beispielsweise Bor oder Gallium) oder fünf Valenzelektronen (beispielsweise Phosphor oder Arsen). Ersetzt man in dem Kristallgitter ein Siliziumatom durch ein Phosphor- oder Arsenatom mit fünf Valenzelektronen (Donatoren), erhöht sich die Menge der freien Elektronen. Das Resultat ist



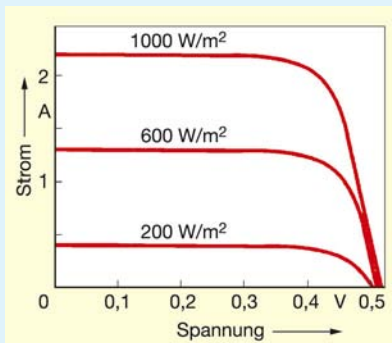
n-dotiertes Silizium. Nimmt man als Ersatz hingegen ein Bor- oder ein Galliumatom mit drei Valenzelektronen (Akzeptoren), entsteht ein „Loch“ (Defektelektron). Man hat dann p-dotiertes Silizium vor sich (Bild 1). Funktion und Verhalten einer Silizium-Solarzelle hängen entscheidend vom so genannten p-n-Übergang ab. Er bildet sich, wenn zwei unterschiedlich dotierte Siliziumschichten übereinander gelegt werden. An diesem Übergang baut sich ein inneres elektrisches Feld (eine Raumladungszone) auf, das eine Trennung der durch das Sonnenlicht paarweise freigesetzten negativen und positiven Ladungsträger (Elektronen und Löcher) bewirkt. Die Elektronen bewegen sich zu den Kontaktfingern auf der Frontseite der Solarzelle und fließen weiter über den äußeren Gleichstromkreis zur Rückseite. Die Löcher hingegen bewegen sich innerhalb der Solarzelle zu deren Rückseite und vereinen sich dort mit den zufließenden Elektronen aus dem Gleichstromkreis. Der Stromfluss wird also nur im äußeren

Stromkreis und im n-Silizium durch Elektronen getragen, im p-Silizium dagegen durch „Löcher“ (Bild 2).

Die Energie des Sonnenlichts bewirkt kontinuierlich die Freisetzung von Elektronen-Loch-Paaren, die in der Raumladungszone getrennt werden und dafür sorgen, dass an den Schichten permanent eine Spannung abgegriffen werden kann. Diese Spannung ist abhängig vom Halbleitermaterial. Bei Silizium beträgt sie etwa 0,5 V. Sie ist bei Einstrahlungen über 100 W/m² relativ konstant, darunter jedoch stark abhängig von der Einstrahlung (Bild 3). Auch Temperatureinflüsse verändern den Spannungswert: Bei Erwärmung sinkt er, bei Abkühlung steigt er an.

3 Leistung einer Solarzelle

Der Energieertrag einer Photovoltaikanlage ist jahreszeitlich bedingt und abhängig von der Sonneneinstrahlung. Der 15-Jahres-Mittelwert der Einstrahlung auf 30° Neigung und Südausrichtung beträgt in Norddeutschland beispielsweise 1070 kWh/m²a. Der Ertrag wird außerdem beeinflusst von Faktoren wie etwa Reflexionen sowie dem Grad der Verschmutzung und der Verschattung der Anlage. Auch die



3 Die Leerlaufspannung von etwa 0,5 V ändert sich bei einer Sonneneinstrahlung oberhalb von etwa 100 W/m² kaum

Eigenschaften der Solarzellen selbst spielen – selbstverständlich – eine große Rolle. Um sie beurteilen zu können, sollte man die Angaben des Herstellers zurate ziehen. Besondere Aufmerksamkeit sind dem Wirkungsgrad, der Strom-Spannungs-Kennlinie (I-U-Kennlinie) und dem Füllfaktor zu widmen.

3.1 Wirkungsgrad

Ein wichtiger Parameter der Solarzelle ist der Wirkungsgrad η . Er setzt die nutzbare elektrische Leistung P_{MPP} ins Verhältnis zur Leistung der einfallenden Sonnenenergie Γ :

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{\Gamma}$$

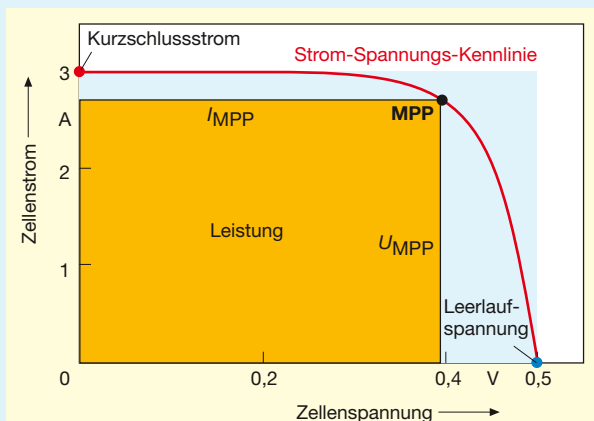
Der Wirkungsgrad einer industriell gefertigten Solarzelle aus monokristallinem Silizium beträgt etwa 16,5 %. Solarzellen aus polykristallinem Silizium erreichen Werte um 15 %. Unter Laborbedingungen sind sogar bis zu 24 % zu erzielen, wobei allerdings ein wesentlich höherer Aufwand erforderlich ist.

3.2 Strom-Spannungs-Kennlinie

Die elektrischen Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit von Solarzellen lassen sich an der Strom-Spannungs-Kennlinie (I-U-Kennlinie) ablesen. Der in Bild 4 als Beispiel dargestellten Kennlinie einer kristallinen Siliziumzelle liegen die standardisierten Testbedingungen STC (standard testing condition) zugrunde. Sie basieren auf einer Sonneneinstrahlung von 1000 W/m², einer Zelltemperatur von 25 °C und einer spektralen Verteilung der Sonnenstrahlung von AM (AirMass) gleich 1,5. Konventionelle kristalline Siliziumzellen und Dünnschichtzellen haben zum Teil einen sehr unterschiedlichen Kennlinienverlauf.

Der Punkt MPP (Maximum Power Point) zeigt den Ort auf der Kennlinie, an dem die elektrische Leistung P_{MPP} einer Solarzelle am größten ist. Sie ergibt sich aus dem Produkt der Solarzellenspannung U_{MPP} multipliziert mit dem Solarzellenstrom I_{MPP} und hat die Einheit W_p (Watt peak). Damit Solarzellen ihre maximal mögliche Leistung abgeben, müssen sie durch eine Anpassung des Lastwiderstands im MPP betrieben werden. Da der Widerstand

4 Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle mit 10 cm x 10 cm Kantenlänge unter Standard-Testbedingungen



bzw. die Spannung der Last in der Regel jedoch eine andere ist, als es dem MPP-Arbeitspunkt entspricht, ist zwischen dem Solargenerator und der Last ein so genannter MPP-Regler erforderlich, der diese Anpassung vornimmt. Bei netzgekoppelten Solarstromanlagen erfolgt die MPP-Regelung durch den Wechselrichter, indem er seine Eingangsspannung an die Betriebsspannung des Solargenerators in dessen Maximum Power Point anpasst.

3.3 Füllfaktor

Eine weitere wichtige Größe zur Beurteilung einer Solarzelle ist der Füllfaktor f . Er beschreibt das Verhältnis von der durch den Strom-Spannungs-MPP gegebenen Rechtecksfläche (in Bild 4 die kleinere) zum idealen Rechteck:

$$f = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{LK}}$$

Das Verhältnis von MPP-Leistung zu einer fiktiven Leistung aus Kurzschluss-Stromstärke und Leerlauf-Spannung wird als Füllfaktor bezeichnet und gilt als Qualitätsmaßstab einer Solarzelle. Typische Werte liegen zwischen 70 und 85 %.

4 Konventionelle Silizium-Wafer-Technologie

In der Photovoltaik-Technologie unterscheidet man zurzeit im Wesentlichen zwei Solarzellen-Technologien: Die eine verwendet etwa 0,3 mm dicke Silizium-Scheiben (Wafer). Die andere, die Dünnschicht-Technologie, arbeitet mit Halbleitern, die auf hauchdünnen Trägermaterialien aus Glas oder Kunststoff aufgebracht werden. Die konventionelle Wafer-Technologie hat zurzeit einen Marktanteil von mehr als 90 %.

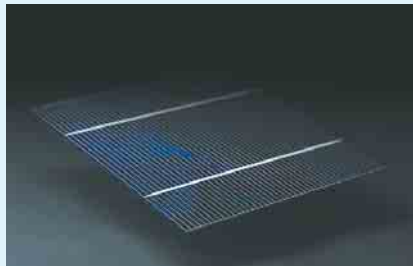
4.1 Herstellung klassischer Wafer

Silizium ist ein chemisches Element, das vier Bindungen mit Nachbaratomen eingeht und dabei harte und spröde Kristalle mit stabiler Diamantstruktur bildet. In der Natur kommt es vor allem in Quarzsand vor, allerdings als Siliziumdioxid (SiO_2), das zunächst in einem energieaufwändigen Hochofenprozess zu reinem Rohsilizium aufbereitet werden muss. Nach einem weiteren mehrstufigen Prozess liegt es dann als Reinstsilizium vor, das sich zu mono- oder polykristallinen Solarzellen verarbeiten lässt (Bilder 5 bis 8).

Monokristalline Solarzellen sind an ihrer glatten dunkelblauen bis schwarzen Oberfläche sowie an den gebrochenen Ecken zu erkennen. Zu ihrer Herstellung bedient man sich fast immer des so genannten **Czochralski-Verfahrens** (Tiegelzieh-Verfahren), in dessen Verlauf man aus einer Siliziumschmelze einkristalline Stäbe zieht, diese anschließend auf einen quadratischen Querschnitt zuschneidet und dann in dünne Scheiben sägt. Dieses Verfahren garantiert relativ hohe Wirkungsgrade.



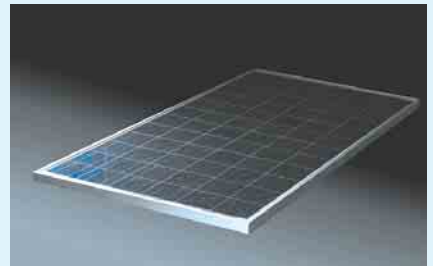
5 Rohstoff: Silizium



7 Zwischenprodukt: Zelle



6 Vorprodukt: Wafer



8 Endprodukt: Solarmodul

Fotos (5-8): Solar World AG

Polykristalline Solarzellen sind leicht an ihrer unterschiedlich blau schimmernden Kristallstruktur zu erkennen. Sie besitzen eine unregelmäßige Oberfläche, auf der sich die Kristalle mit einem Durchmesser von einigen Millimetern bis Zentimetern deutlich abzeichnen. Sie sind der kostengünstigste Solarzellentyp und deshalb am weitesten verbreitet. Für ihre Herstellung gibt es unterschiedliche Verfahren.

► Beim **Gießverfahren** wird Reinstsilizium in einem Tiegel mithilfe einer Induktionsheizung geschmolzen und dann langsam in eine quadratische Wanne gegossen, in der es dann langsam abkühlt und erstarrt. Die Kantenlänge der Wanne beträgt etwa 50 cm, die Höhe der erstarrten Schmelze rund 30 cm. Der ausgekühlte Silizium-Block wird dann in mehrere Säulen von circa 30 cm Länge zerteilt und zu Wafern zersägt.

► Auch beim **Bridgman-Verfahren** wird Reinstsilizium zunächst in einem Tiegel geschmolzen. Die langsame Abkühlung der Schmelze bewirkt dann die Bildung gleichgerichteter Kristallgitter. Das Besondere ist, dass das Schmelzen und die Kristallisation des Siliziums in einem Arbeitsprozess stattfinden, das Silizium also im Tiegel verbleibt. Die Abkühlung und damit das Erstarren erfolgt vom Tiegelboden her. Die Kantenlängen des entstehenden Blocks sind mit 60 bis 70 cm etwas größer als beim Gießverfahren, die Höhe beträgt 20 bis 25 cm. Auch in diesem Fall wird der große Silizium-Block zunächst in mehrere Säulen zerteilt und dann zu Wafern zersägt.

► Die vorgenannten Verfahren leiden alle unter dem Nachteil, dass beim Zersägen der Silizium-Blöcke hohe Materialverluste entstehen. Die Abfälle sind zu stark verunreinigt, als dass sie sich noch einmal für den Bau von Solarzellen verwenden ließen. Beim **EFG-Verfahren** (EFG: Edge-Defined Film-Fed Growth) sind solche Sägeverluste weitgehend ausgeschlossen. Um EFG-Wafer herzustellen, wird

das Silizium an einem achteckigen Ziehkörper aus der Schmelze bereits in der gewünschten Dicke herausgezogen. Es entsteht dabei kein Siliziumblock mehr, sondern ein hohles Achteck-Rohr mit einer sehr dünnen Wand. Aus diesem Körper werden mit einem Laser die Wafer herausgeschnitten, nahezu ohne Materialverlust. Bei den so erzeugten Zellen handelt es sich ebenfalls um polykristallines Material, das sich aber vom Aussehen her deutlich von den gesägten Zellen unterscheidet. Unter anderem ist die Oberfläche welliger. Dieses Verfahren wird auch Bandzieh-Verfahren genannt. Es ermöglicht die Herstellung von Solarzellen mit deutlich geringerem Energieeinsatz.

4.2 Weiterverarbeitung zur Solarzelle

Um zu einer funktionsfähigen Solarzelle zu werden, muss der frisch gesägte Silizium-Wafer sich noch einigen Prozeduren unterwerfen. Er wird zunächst von allen Seiten geätzt und gereinigt. Der oberflächennahe Bereich, der durch das Schneiden des Siliziums geschädigt wurde, wird dabei entfernt. Gleichzeitig lässt sich durch geeignete Ätzverfahren (Oberflächentextur) eine Oberfläche schaffen, die die Absorptionsfähigkeit verbessert. Nach der nasschemischen Ätzung und Reinigung wird die Siliziumscheibe in einem Ofen bei 800 °C bis 1 000 °C einer (in der Regel) phosphorhaltigen Atmosphäre ausgesetzt. Dabei diffundiert der Phosphor etwa 0,5 bis 1 µm tief in den Wafer hinein. Die neu entstandene, mit Phosphor dotierte Siliziumschicht ist im Gegensatz zum positiv leitfähigen Ausgangswafer negativ leitfähig. Man spricht von einem n^+ -Emitter. Die Solarzelle hat jetzt den p-n-Übergang, der den gewünschten photovoltaischen Effekt bewirkt.

Der nächste Schritt besteht darin, auf den beiden Schichten der jetzt fast fertigen Solarzelle die elektrischen Anschlüsse herzustellen. Zuvor jedoch erhält die Vorderseite noch eine Antireflexschicht, meist aus Siliziumnitrid, um die Verluste durch Reflexion zu minimieren.



9 Die bandgezogene „Silizium-Oktagon-Technologie“ ist ein besonders wirtschaftliches Verfahren zur Herstellung von Wafern.
Foto: Jens Meyer

Der Kontakt für die Vorderseite besteht aus einer Silberlegierung und hat die Form eines dünnen „Fingers“. Diese Auslegung verringert die Lichtabschattung. Auf der Rückseite genügt eine ganzflächige Schicht aus Aluminium. Das Anbringen der Kontakte erfolgt bei Temperaturen um 800 °C. Dabei sintert das Silber durch die Antireflexschicht und verbindet sich mit dem Emitter, während sich im selben Arbeitsschritt das Aluminium auf der Rückseite mit dem Silizium vermischt und eine hoch dotierte positive Oberflächenschicht erzeugt (Back Surface Field, BSF), was die Verluste an der Solarzellenrückseite reduziert).

4.3 Wirkungsgrad optimieren

Theoretisch könnten die hier beschriebenen klassischen Solarzellen mit Silizium-Wafern Wirkungsgrade von über 30 % erreichen. Dazu müsste es allerdings gelingen, die elektrischen und optischen Verluste sowie die Verluste durch Rekombination – wenn ein Elektron ein Loch füllt und deswegen nicht mehr zum Ladungstransport zur Verfügung steht – stark zu minimieren. Es gibt auch schon einige verbesserte Konzepte mit monokristallinen Silizium-Wafern, die allerdings teils hohe Qualitätsansprüche an das verwendete Material stellen und somit recht teuer sind.

Einige Beispiele:

- Abschattungsverluste lassen sich verringern, indem man die Frontkontakte in per Laser geschnittene Vertiefungen chemisch abscheidet („vergräbt“). Damit werden Wirkungsgrade von über 17 % erreicht.
- Man kombiniert das sehr gute Absorptionsvermögen und die passivierende Wirkung des amorphen Siliziums mit den guten elektrischen Eigenschaften von monokristallinem Silizium. In der Produktion erreichen die nur 200 µm dicken Solarzellen einen Wirkungsgrad von gut 18,5 %.
- Der Emitter wird auf die Rückseite diffundiert; alle Kontakte sind ebenfalls hinten

angeordnet, sodass es auf der Vorderseite zu keiner Abschattung durch Metallbahnen kommen kann. In einer Pilotlinie werden Wirkungsgrade von über 21 % erreicht.

Diese Ansätze – und es gibt mittlerweile mehr als die drei genannten – zielen darauf ab, Verluste zu minimieren. Doch die Wirkungen der Maßnahmen können auch kontraproduktiv sein. So kann eine Reduktion optischer Verluste zu einer Erhöhung des elektrischen Widerstandes führen. Oder die Oberflächenstruktur bewirkt eine erhöhte Rekombination und damit einen Ausfall von Ladungsträgern. Hinzu kommt, dass die Konzepte in den meisten Fällen noch nicht auf die kostengünstigeren polykristallinen Silizium-Wafer übertragbar sind. Fazit: Den vielen Möglichkeiten, den Wirkungsgrad zu erhöhen, stehen zurzeit noch eben so viele Schwierigkeiten gegenüber.

4.4 Herstellungskosten senken

Solarzellen auf Dauer wettbewerbsfähig zu machen, erfordert auch, die Herstellungskosten zu reduzieren. Derzeit kommt immer noch Silizium zum Einsatz, dessen Qualität den hohen Ansprüchen der Mikroelektronik entspricht. Das wird sich ändern: Durch Vereinfachungen des Reinigungsverfahrens lässt sich ein spezielles Solar-Silizium herstellen, das bei etwas geringerer Qualität, aber deutlich niedrigeren Herstellungskosten auf die Ansprüche der Photovoltaik abgestimmt ist. Die teilweise hohen Materialverluste beim Sägen von Wafern sind ein weiterer Schwachpunkt. Bei einigen Herstellungsverfahren gehen 40 bis 50 % des Siliziums verloren. Auch hier gibt es bereits Verbesserungen, wie das genannte Bandzieh-Verfahren (EFG-Verfahren, Bild 9). Auch effizientere Fertigungstechniken werden in Zukunft in hohem Maße zur Kostenreduktion beitragen können. In der Entwicklung und Erprobung befinden sich beispielsweise Plasma- und PVD-Verfahren, Alternativen zur Nasschemie und der Einsatz von Lasern.

Ein weiterer Weg zur Kostenreduktion ist die Herstellung dünnerer Wafer, die bei gleicher Fläche weniger Silizium benötigen. Während die Standarddicke kristalliner Silizium-Wafer lange bei 330 µm lag, werden heute bereits vielfach 270 µm oder sogar 240 µm dünne Wafer produziert.

5

Dünnschicht-Solarzellen

Trotz aller Fortschritte – konventionelle auf Silizium basierende Solarzellen werden aus physikalischen Gründen wohl kaum eine Dicke von 50 µm unterschreiten können. Mit der Dünnschicht-Technologie ist eine weitere Reduzierung jedoch sehr wohl möglich. Die Bedeutung dieses Verfahrens mag man einer Beihilfe der Bundesregierung in Höhe von 45,5 Mio. Euro für die Errichtung einer Fabrik zur Herstellung von Dünnschicht-Solarzellen in Frankfurt an der Oder ablesen. Die staatliche

Unterstützung wurde Ende April 2006 genehmigt.

In Dünnschicht-Technologie gefertigte Solarmodule basieren auf Halbleitern, die vorzugsweise großflächig und meist kostengünstig auf preiswerte Substrate (Trägermaterialien) wie beispielsweise Glas-, Metall- oder Plastikfolien aufgebracht werden. Es gibt unterschiedliche Varianten, manche befinden sich im Forschungsstadium, andere stehen kurz vor der Markteinführung, einige werden bereits in Solarparks der Megawatt-Klasse eingesetzt. Man hofft, dass sie auf lange Sicht die sehr kostenintensive Silizium-Wafer-Technologie ersetzen können. Mögliche Halbleiter sind kristallines und amorphes Silizium, Gallium-Arsenid, Cadmium-Tellurid und Kupfer-Indium-Gallium-Schwefel-Selen-Verbindungen.

Alle genannten Dünnschicht-Techniken könnten in Zukunft wichtige Vorteile zum Tragen bringen:

- Die Dicke der Schichten ist auf ein Minimum von wenigen μm reduziert. Dadurch wird teures Halbleitermaterial im Vergleich zur konventionellen Wafer-Technologie eingespart.
- Das Zusammensetzen der Module aus Zellen entfällt, denn die großflächig abgeschiedenen Halbleiterschichten werden in kleinere Zellen unterteilt und dann integriert verschaltet.
- Mit der Dünnschicht-Technologie lassen sich quadratmetergroße Glassubstrate beschichten, was den Handhabungsaufwand in der Fabrik senkt.

6

Von der Zelle zum Modul

Eine Gruppe von Solarzellen wird so zusammengeschaltet, dass sich die niedrigen Einzelspannungen zu einer höheren, für bestimmte Anwendungen besser nutzbaren Spannung addieren. Außerdem werden sie zum Schutz vor äußeren Einwirkungen in Modulen eingekapselt (Bild 8).

6.1 Parallel- und Reihenschaltung von Zellen und Modulen

Um auch höhere elektrische Anschlussleistungen bereitstellen zu können, werden die einzelnen Solarzellen in Reihenschaltung zu Zellsträngen und diese wiederum in Parallelschaltung zu einem Solarmodul zusammengefasst. Die sich hieraus ergebenden Strom-Spannungs-Kennlinien der Module leiten sich aus den Kennlinien der einzelnen Solarzellen ab. Das Gleiche spielt sich bei der Zusammenfassung von Modulen zu einer kompletten Solaranlage (Solarkraftwerk) ab. Bei der Reihenschaltung zu einem Modulstrang addieren sich die Modulspannungen. Auf diese Weise lässt sich die für den Wechselrichter benötigte Eingangsspannung einfach erreichen. Bei einer Parallelschaltung von Modulen beziehungsweise Modulsträngen hingegen addieren sich die Ströme. Bei vorgegebener Wechselrichter-Gleichspannung kann die Leistung des Solargenerators stufenweise entsprechend der Anzahl der parallelen Stränge erhöht werden.

Die typischen Nennleistungen von Standard-Solarmodulen liegen zwischen 10 W_p und 100 W_p . Den Angaben liegen die Standardtestbedingungen (STC) mit 1 000 W/m^2 Sonneneinstrahlung bei 25 °C Zelltemperatur zugrunde. Die von den Herstellern angegebenen Garantiezeiten – in der Regel zehn Jahre – sind recht ordentlich und bezeugen den hohen Qualitätsstandard und die hohe Lebenserwartung heutiger Produkte.

6.2 Folgen umwelt- und systembedingter Abschattung

Bei einer Reihenschaltung wird der Strom bestimmt durch die Zelle mit dem höchsten Widerstand. Diese elektrische Gesetzmäßigkeit erlangt dann Bedeutung, wenn eine in Reihe geschaltete Solarzelle umwelt- oder systembedingt abgeschattet wird. Zwei Beispiele mögen den Sachverhalt verdeutlichen:

- Wird eine Solarzelle teilweise abgeschattet, steigt ihr Innenwiderstand, der Strom sinkt bei der gegebenen Reihenschaltung aber nicht nur in dieser Zelle, sondern im gesamten Zellstrang. Die dadurch entstehende Leistungsreduktion ist überproportional hoch im Vergleich zur abgeschatteten Fläche. Wird nämlich eine Zelle eines Moduls aus 36 in Serie geschalteten Zellen zu 50 % abgeschattet, reduziert sich die bestrahlte Fläche zwar nur um $1/72$ ($= 1,4 \%$), der Strom und damit die Leistung aber sinken um die Hälfte.
- Wird eine Solarzelle vollständig abgeschattet, wandelt sich die Zelle praktisch in eine Diode um, die in Sperrrichtung gepolt ist. Die Folge: Die Solarzelle wird sehr hochohmig, es kann kein Strom mehr fließen. Der gesamte Zellenstrang fällt aus und erzeugt keine Leistung mehr.

In der Praxis gibt es technische Lösungen, die dieses Problem beheben. Die einfachste ist die, alle Solarzellen mit parallel geschalteten



10 Photovoltaik-Module kombiniert mit farbigem Glas sorgen für ein nettes Ambiente und Energieersparnis zugleich.

Foto: Schott AG

Dioden auszurüsten. Da diese Lösung aber recht aufwendig ist, wird bei den meisten kommerziellen Anlagen immer ein komplettes Modul mit einer Parallel-Diode überbrückt.

6.3 Schutz vor mechanischen und umweltbedingten Einflüssen

Um die Solarzellen vor mechanischen Beschädigungen und Witterungseinflüssen zu schützen, werden sie ein Verbundmaterial eingebettet, das gleichzeitig die leitfähigen Teile des Moduls isoliert. Es besteht meistens aus transparentem Ethylen-Vinyl-Acetat (EVA). Das Ganze wird dann mit einem Rahmen aus Aluminium oder Edelstahl versehen und frontseitig transparent mit Glas abgedeckt. Solche Module werden in der Regel seriell hergestellt, was für den Kunden auf den ersten Blick nachteilig aussieht, weil er die Maße nicht nach seinen Wünschen beeinflussen kann. Doch das Angebot unterschiedlicher Größen ist so vielfältig, dass in dieser Hinsicht keine großen Probleme auftreten dürften. Die Standardmodule werden in Leistungsklassen zwischen 50 W_p und 150 W_p angeboten. Aber auch 200- W_p -Module sind lieferbar. Da pro 100 W_p Leistung eine Fläche von 1 m^2 anzusetzen ist, liegt die Größe der gängigen Module also zwischen etwa 0,5 und 2 m^2 .

Einige Hersteller bieten ungerahmte Module an. Sie werden als Glas-Folien-Lamine oder Glas-Glas-Lamine mit EVA-Folien gefertigt und deshalb auch kurz „Lamine“ genannt. Häufigste Verwendung finden sie als Dachelemente bei der Schrägdachintegration. Eine Vielzahl von Herstellern bietet Profilsysteme an, mit denen sich Standardlamine zu attraktiven Dachflächen verarbeiten lassen. Solarmodule können neben ihrer Funktion als Solarkraftwerk gleichzeitig als Teil der Gebäudehülle Aufgaben des Wärme-, Sonnen- oder Sichtschutzes übernehmen (Bild 10). Diese Technologie eröffnet ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten. ■

Fortsetzung



**ELEKTRO
PRAKTIKER**

**Anlagenplanung, Montage,
autarker Betrieb, Betrieb am Netz,
Wechselrichter, Normen,
Fehlerbehebung, Produkte am Markt**