

# Photovoltaik

Hans-Günther Wagemann

Das große Interesse der Öffentlichkeit und die Faszination, die die Direktwandlung der Sonnenstrahlung in elektrische Energie ausübt, ist erstaunlich. Wenn man den Anteil von etwa 0.03% der Photovoltaik an der deutschen Stromerzeugung bedenkt, wächst die Verwunderung. Denn diese neuartige Technik veranlaßt private Hausbesitzer, ihr Geld für die aufwendige Umrüstung des eigenen Hausdaches mit zwei oder drei Kilowatt Solarzellen auszugeben, ohne daß dafür zwingender Bedarf vorhanden ist oder, daß man in den nächsten Jahren mit einer Amortisierung der Anlage rechnen kann. Die Studenten vieler Disziplinen interessieren sich für die Grundlagen der Photovoltaik und wollen ganz persönlich die Herstellung von Solarzellen erlernen. Der Staat fördert die Entwicklung und Anwendung der Solarzellen durch großzügige Programme. Allein im Jahre 2002 hat die Bundesrepublik Deutschland für die Photovoltaik etwa vierhundert Millionen Euro aufgewendet. Das 100.000-Dächer-Programm der Bundesregierung, das privaten Hausbesitzern den subventionierten Photovoltaik-Generator auf dem Dach verschafft mit garantierter Einspeise-Rückvergütung, war im Juli 2003 dank des hohen Interesses der Öffentlichkeit ausgebucht. Seit 1990 hat sich die installierte Leistung von Photovoltaik-Anlagen in Deutschland mehr als ver Hundertfacht. Die Solarzellen-Hersteller investieren in neue Produktionslinien. Versuchen wir diese Euphorie zu verstehen, indem wir Entwicklungslinien nachvollziehen und uns den erreichten Stand der neuen Technik vergegenwärtigen. Wir wollen dabei aber auch die Probleme sehen, die durch hoch gesteckte Erwartungen entstehen.

## Die Entwicklung der Photovoltaik bis zur heutigen Reife

Die Physik betrachtet die photovoltaische Energie-wandlung als eine Besonderheit, weil sie unter allen Arten der Energiewandlung durch thermodynamische Maschinen mit einem unerschöpflichen Energiereservoir mit vergleichsweise geringer Erzeugung von Verlusten in der Form zusätzlicher Entropie abläuft. Die Wechselwirkung von Strahlung und Materie steht seit der Entdeckung des Planckschen Gesetzes im Mittelpunkt der modernen Physik. Die Entwicklung der Quantenphysik des Festkörpers führte zum Verständnis der elektronischen Halbleitung. Schon bald nach der Entdeckung der Halbleiterdiode (Tafel 1) wurde im Jahre 1954 die Silizium-Solarzelle (Tafel 2) vorgestellt. Auch angesichts schneller Fortschritte bei der Erhöhung des Anfangswirkungsgrades auf 10% jedoch bemerkt G.L. Pearson von den Bell Labs in Murray Hill/USA in einem Artikel von 1957 über künftige Anwendungen der neuen Energiewandlung, daß sie im kleinen Maßstab auf Spezialanwendungen beschränkt bleiben wird [9]. Tatsächlich aber sind im Jahre 2002 weltweit annähernd ein Gigawatt an photovoltaischer Energie installiert, eine Kapazität, die – tagsüber und bei klarem Himmel – der Leistung von ein bis zwei konventionellen Kraftwerken entspricht. Da es bislang keine wirkungsvollen Speicher elektrischer Energie gibt, ist der Zusatz „tagsüber und bei

klarem Himmel“ eine starke Einschränkung der Verfügbarkeit photovoltaischer Energie. Dessen ungeachtet drückt sich eine bemerkenswerte Euphorie in der derzeitigen jährlichen Zuwachsrate von 26% aus.

Der Siegeszug der Solarzellen begann in den fünfziger Jahren, allerdings anders als zunächst erwartet. Der Technikpionier M. Prince berichtete auf der Photovoltaik-Weltkonferenz in Osaka 2003, wie erstmals im Jahre 1958 in den USA Solarzellen erfolgreich zur elektrischen Versorgung eines Satelliten verwendet wurden. Bis in die siebziger Jahre lag hier die Hauptanwendung der „Solarelemente“. Und auch europäische Hersteller wie RTC Compelec in Caen/Frankreich und Telefunken in Heilbronn sammelten wichtige Erfahrungen bei den Projekten europäischer Nachrichtensatelliten wie „Azur“ und „Symphonie“. Inzwischen sind für Nachrichtensatelliten wahre Wunderwerke entstanden: mit teleskopartig aufeinander gebauten Mehrfach-Dünnschicht-Solarzellen und minimiertem Gewicht bei 30 % Wandlungswirkungsgrad. Erst nach der Energiekrise Anfang der 70er Jahre erwog man die „terrestrische“ Verwendung von Solarzellen. Bislang wurden die Solarzellen für den Weltraum aus teurem einkristallinem Silizium nach den aufwendigen Verfahrensschritten der Mikroelektronik hergestellt oder aus dem noch teureren, dafür im Weltraum leistungsfähigeren Galliumarsenid, bis im Jahre 1978 B. Authier/Wacker Heliotronik, Burghausen und H. Fischer/Telefun-

## Der pn-Übergang und seine Raumladungszone

Solarzellen bestehen aus Halbleiter-Werkstoff und bilden einen *pn-Übergang*, wenn Elektronen-Leiter (n-Halbleiter) und Löcher-Leiter (p-Halbleiter) eine gemeinsame Kontaktfläche haben. Dabei entsteht beiderseits der Kontaktfläche eine *Raumladungszone* der ionisierten Dotieratome, zwischen denen eine hohe *elektrische Feldstärke E* existiert, die die durch ab-

(rot), die als *bewegliche* Ladungsträger ihre *ortsfesten* Dotieratome neutralisieren. Unten sind nach Kontakt beider Bereiche die beweglichen Ladungsträger der obersten Dotieratome über die Kontaktfläche *diffundiert* und im anderen Bereich *rekombiniert*. Als Folge bleiben Dotieratome unkompensiert und erzeugen ein elektrisches Feld. Dieses elektrische Feld

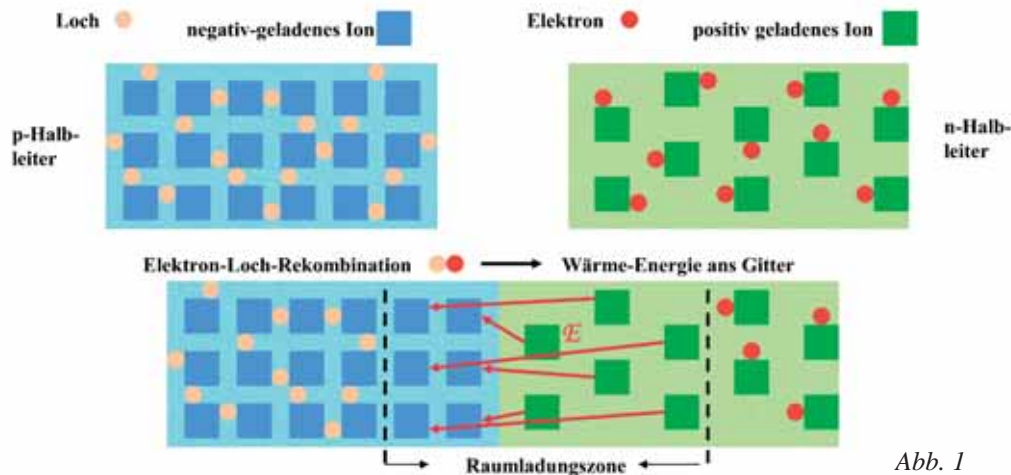


Abb. 1

sorbiertes Sonnenlicht erzeugten Elektronen-Loch-Paare zu trennen vermag. Ohne Trennung *rekombinieren* (d.h. verschwinden unter Energieabgabe) die Paare an Kristallstörungen und sind für die photovoltaische Energieumwandlung verloren.

In Abb. 1 ist der linke p-leitende Bereich hoch dotiert, während der rechte n-leitende Bereich geringer dotiert ist: die unterschiedlichen Dichten der quadratisch eingezeichneten *Dotieratome* symbolisieren dies. Oben erkennt man vor Kontakt beider Bereiche die rund gezeichneten Löcher (beige) und die Elektronen

über der *Raumladungszone* unkompenzierter Dotieratome ist das wichtigste Merkmal eines pn-Überganges. Über die Raumladungszone integriert ergibt die elektrische Feldstärke die *Diffusionsspannung* des pn-Überganges von ca. 0,4 - 0,5 Volt. Jede Halbleiter-Diode enthält eine Raumladungszone, so auch die Solarzelle. In der Raumladungszone der Solarzelle werden die solar-erzeugten Elektron-Loch-Paare getrennt und finden erst nach Leistungsabgabe im externen Verbraucher wieder als Partner zusammen zur Rekombination (siehe „Grundlagen der Solarzellen“).

ken, Heilbronn eine gänzlich neue Lösung vorstellten [1], [5]. Aus blockgeggessenem polykristallinem Silizium (Tafel 3) mit unkonventionellen Verfahrensschritten der Massenproduktion (wie Siebdrucken der stromabgreifenden Elektroden und der Antireflexionsschichten sowie Einsintern der Dotierstoffe im Durchlaufofen) entstanden „low cost“-Solarzellen mit dem respekablen Wirkungsgrad von 13% und zu einem Bruchteil der Kosten von Weltraumzellen. Seitdem gilt bis heute: Nötig sind preiswerte und leicht verfügbare Ausgangswerkstoffe, deren Reinheit nicht allzu hohe Ansprüche erfüllt und aus denen nur die photovoltaisch wirksame Schicht aufgebaut ist. Weiterhin nötig ist die „Abmagerung“ aller Fertigungsschritte unter dem Kostengesichtspunkt, ohne dabei allzu große Wirkungsgrad-Einbußen hin-

nehmen zu müssen. In der Massenfertigung erreicht man Wirkungsgrade von 16% und mehr (Tafel 4). Heute liegen der Fachwelt jedoch völlig neue Vorschläge zur Steigerung auf Werte bis 80% des Energie-Wandlungswirkungsgrades vor für die „Solarzellen der 3. Generation“, wie M. A. Green diese neuartig konzipierten Bauelemente nennt [7].

## Aufwand und Kosten der Photovoltaik

Die Kosten betragen ungefähr 6.000 Euro für Solarzellenmodule einer 1-Kilowatt-Anlage auf einem deutschen Dach. In günstigen Lagen mit jährlichen 1.300 Sonnenstunden (z.B. Freiburg i. Breisgau) „erntet“ man damit bis zu 1.000 kWh an elektrischer Energie. Mit den üblichen Zinsen er-

## Grundlagen der Solarzellen

Es ist wichtig, daß die *Absorption der Photonen* und die *Generation der Ladungsträgerpaare* in der Nähe der *Raumladungszone* stattfinden, weil diese ansonsten aus großer Entfernung herandiffundieren müssen und auf dem Wege leicht rekombinieren. Besonders geeignet für diesen Vorgang sind die „direkten“ Halbleiter, bei denen Absorption und Ge-

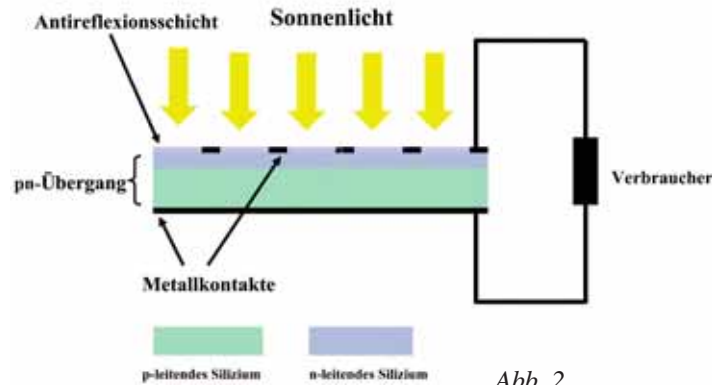


Abb. 2

neration oberflächennah in einer dünnen Schicht (1...5  $\mu\text{m}$ ) ablaufen, während bei „indirekten“ Halbleitern sich diese Vorgänge über Tiefen bis zu 100...200  $\mu\text{m}$  erstrecken. Kristallines Silizium ist von seiner optischen Anpassung ans Sonnenlicht besonders gut für

dessen Absorption geeignet, jedoch als „indirekter“ Halbleiter weniger gut für die Ladungsträger-Sammlung. Nur bei fehlerfreiem Material gelingt erfolgreiche Trennung der Elektronen-Loch-Paare im Feldgebiet nach Diffusion von weit her. Die „direkten“ Halbleiter wie Galliumarsenid und amorphes Silizium bieten hier Vorteile zum Aufbau sehr viel dünnerer Solarzellen. Allerdings sind die Bestandteile von Galliumarsenid in der Erdkruste nur sehr gering anzutreffen und deshalb auch erheblich teurer. Amorphes Silizium zeigt bis heute große Instabilität seiner photovoltaischen Wirksamkeit im Sonnenlicht. Die *kristalline Silizium-Solarzelle* besteht aus einem pn-Übergang, dessen dem Sonnenlicht zugewandte Seite, der *n-Emitter*, recht dünn ( $\sim 1\mu\text{m}$ ) ist. Die andere Seite, die *p-Basis*, mißt heute ungefähr 200-300  $\mu\text{m}$ .

Die sonnenzugewandte Seite ist mit einer Oberfläche versehen, die das optische Reflexionsvermögen vermindert. Dafür raut man die Oberfläche der Solarzelle samtartig auf und beschichtet sie außerdem mit Interferenzschichten.

gibt sich dann über einen Zeitraum von zehn Jahren ein Preis einer selbst erzeugten und verbrauchten Kilowattstunde von ungefähr 0,65 – 1,0 Euro, während man derzeit einige Cent weniger, nämlich 0,57 Euro, für jede ins öffentliche Netz eingespeiste Kilowattstunde vergütet erhält [4]. Diese Rechnung scheint für den engagierten Privatmann halbwegs ausgeglichen, allerdings nur infolge gesetzlicher Verfügung. Die eigentliche Konkurrenzsituation erkennt man am besten bei einem Blick auf die monatliche Stromrechnung im Vergleich mit dem vom örtlichen Elektrizitätsunternehmen abgerechneten Preis von weniger als 0,20 Euro pro Kilowattstunde.

Es muß noch einiges geschehen, bevor sich auch in Deutschland die Photovoltaik als konkurrenzfähig erweist. Bei der Analyse der Kosten für die Herstellung von Solarzellen ergibt sich ein Anteil von 40% für das Silizium-Material und ein gleich hoher Anteil für die Modul- und Systemtechnik. Der Rest fließt in die Verfahrenstechnik. Entsprechend richten sich die Überlegungen zur Kostensenkung vor allem auf den Solarzellen-Werkstoff, dessen für die Einzelzelle verwendete Menge gesenkt werden muß. Auch für die Bereitstellung des

Ausgangsmaterials für das „solar grade silicon“ müssen neue Konzepte entwickelt werden, wenn die Ausweitung der Solartechnik bei uns weiter so wie bisher verlaufen soll.

## Nachhaltige Entwicklung von Solarzellen

Die Konzepte zur Herstellung von Solarzellen für den „irdischen“ Gebrauch beachten heute zusätzlich alle Zielvorgaben einer „nachhaltigen“ Entwicklung, ja, sie sind geradezu zu Musterbeispielen technischer Problemlösungen geworden. Deren fünf Gesichtspunkte sind: Materialintensität; Energieintensität; Wiederverwendung/Wiederverwertung; Minimierung der Toxizität und Einsatz von erneuerbaren Energien [11].

*Materialintensität.* Das bislang meist benutzte Material für Solarzellen ist Silizium, das zweithäufigste Element der Erdkruste. Etwa 95 % aller Solarzellen bestehen heute aus Silizium. Um das hochreine Ausgangsmaterial für Solarzellen zu gewinnen, müssen große Mengen von Quarzsand verarbeitet werden. Die erforderliche Reinheit („Fünf-Neuner-Material“, d.h. 99,999% Reinheit von

Fremdstoffen) geht um ein Vielfaches über die üblichen Anforderungen an technische Werkstoffe hinaus und erreicht bereits die Anforderungen für Silizium in der Chip-Fertigung, die hier „Sieben-Neuner Material“ erfordert. Das erwähnte „Abmagnern“ der Verfahrensschritte bezieht sich u.a. auf tolerierbare Verunreinigungen bei Solarzellen, aber auch auf die kristalline Struktur des Halbleiters. Der Kokillen-Guß von Silizium faßt sowohl Gesichtspunkte der Reinheit als auch der kristallinen Struktur zusammen, indem er polykristalline Blöcke erzeugt, die sich – senkrecht zur ausgebildeten Säulen-Struktur der Mikrokristallite gesägt – nahezu wie monokristallines Material verhalten (Tafel 3). Allerdings müssen nach wie vor dünne Scheiben („wafer“) gesägt werden. Dabei entsteht viel Sägeverschnitt in Form von Silizium-Staub, ein ärgerlicher Verlust. Deshalb hat man mit großem Einsatz Verfahren entwickelt, wie man ohne großen Sägeverschnitt auskommt. Dafür steht u.a. das EFG-Verfahren (*edge-defined film-fed growth*), bei dem das gereinigte Roh-Silizium in Rohren dünner Wandstärke mit Oktogon-Profil gezogen wird, die dann lediglich an den Kanten des Achteck-Querschnittes mit dem Laser getrennt werden und mit sehr viel geringerem Verschnitt Ausgangswafer für Solarzellen ergeben. Derartige

Zellen werden inzwischen auf dem Markt angeboten (RWE Solar Essen).

Bei der Dünnschicht-Solarzelle wird die teure photovoltaisch-aktive Halbleiter-Schicht auf einem Träger aus preiswertem Material wie Glas, Keramik, Stahl usw. aufgebracht. Am eindrucksvollsten waren die anfänglichen Fortschritte der Solarzellen aus „amorphem“, d.h. nicht-kristallinem Silizium auf Flachglas. Eine Schicht von nur 1 µm des hochreinen Siliziums ergibt Solarzellen mit 10% Wirkungsgrad. Außerdem lassen sich die Dünnschicht-Solarzellen hintereinander schalten, so daß am 30x30 cm<sup>2</sup> Zellen-Modul bis zu 24 Volt abgegriffen werden anstelle der 0,5 Volt einer kristallinen Einzelzelle. Hier schien die Lösung für eine preiswerte Technik terrestrischer Solarzellen zu liegen. Allerdings stellte man bald anhand der Betriebsdaten großer Feldversuche fest, daß das Sonnenlicht die Solarzellen aus amorphem Silizium allmählich verändert und ihren Wirkungsgrad sinken läßt. Diese Schädigung hängt mit dem Aufbau des amorphen Siliziums zusammen. Es besteht aus einer Legierung von Silizium und Wasserstoff, der zur Bildung kovalenter Bindungen mit nicht-gepaarten Elektronen-Valenzen des amorphen Silizium-Netzwerkes führt. Durch die Energie des Sonnenlichtes werden die Wasserstoff-Atome aus

### Guß von polykristallinen Silizium-Blöcken („silicon ingot casting“)

Beim Blockguß von polykristallinem Silizium kommt es darauf an, eine mikrokristalline Struktur von säulenförmigen Mikrokristalliten zu erzeugen. Dies erzielt man durch eine spezielle Abkühlungstechnik der Gußblöcke. Man führt den Prozeß derart, daß sich zu-

nächst der Kokillenboden abkühlt und die Silizium-Schmelze dort erstarrt. In der Folge kühlt man von unten nach oben ab, so daß lanzettförmige Mikrokristalle von unten nach oben wachsen. Mit diesem Wachstum findet gleichzeitig über Segregation an der Phasengrenze fest – flüssig eine *Reinigung* von den wichtigsten Verunreinigungen statt.

Abb.3 zeigt links den aufgeschmolzenen Zustand des Siliziums, rechts – nach der Entfernung der thermischen Isolation am Kokillenboden – das beginnende *kolumnare Wachstum* des Gußblockes [12]. Der Gußblock wird senkrecht zur kolumnaren Wachstumsrichtung in Scheiben zersägt. Bei der Solarzellen-Herstellung erzeugt man in jeder Scheibe zahlreiche parallel-arbeitende mikrokristalline Solarzellen. Wichtig ist, daß alle Mikrokristallite parallel zueinander stehen, damit diffundierende Ladungsträgerpaare nicht die Korngrenzen überqueren und dabei rekombinieren.

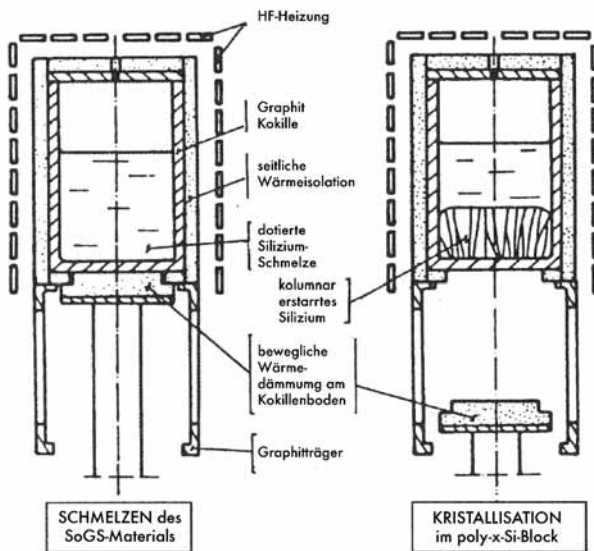


Abb. 3

der Bindung ans Silizium befreit, verbinden sich irreversibel mit einem zweiten Wasserstoff-Atom zu molekularem Wasserstoff und hinterlassen das nun unangesättigte Silizium-Elektron als „Rekombinationsfalle“ für solar erzeugte Elektronen, die damit der Nutzung entzogen werden. So lassen sich trotz intensiver Forschungen die amorphen Silizium-Dünnschicht-Solarzellen im großen Maßstab nur begrenzt zur Energiewandlung einsetzen. Das „Arbeitspferd“ bleibt weiterhin das Massiv-Silizium.

Unter dem Gesichtspunkt der *Energieintensität* ist massives Silizium allerdings nicht die erste Wahl. Um die chemische Reduktion des Quarzsandes zu elementarem Silizium und die notwendige Reinheit des kristallinen Ausgangsmaterials zu erreichen, benötigt man beim Standardverfahren der Chipindustrie für die gezogenen Einkristalle bis zu 2000 kWh/kg. Daher haben sich die Silizium-Hersteller stets an der Wasserkraft angesiedelt, wie die Firma Wacker Siltronic in Burghausen an der Salzach. Es hat nicht an Versuchen gefehlt, durch veränderte Verfahrensschritte wie z.B. das Auslaugen des Rohsiliziums oder durch eine aluminothermische Aufbereitung den Energieeinsatz für das Ausgangsmaterial zu senken, aber einen technischen „Durchbruch“ gegenüber dem industriell praktizierten Standard-Verfahren (Tafel 3) hat es nicht gegeben. So ist die Herstellung von Silizium-Solarzellen bis heute von hohem Material- und Energie-Einsatz gekennzeichnet. Beim Blockgießen im großen Maßstab kann man die benötigte Energie zwar auf 1000 kWh/kg verringern. Je nachdem, wie der Prozeß geführt wird, benötigt man für moderne Massiv-Solarzellen mit der Leistung von 1 Kilowatt bis zu 16 kg Rohsilizium, eine gewaltige Menge, die es künftig ebenfalls zu verringern gilt. Die *Energierücklaufzeit* beschreibt das Verhältnis von im Verlaufe der Lebensdauer gewonnener zum Wert der bei der Herstellung eingesetzter Energie einer Energiewandlungs-Technologie. Starten wir für eine Abschätzung mit den Angaben aus einem Prospekt zu multikristallinen Solarzellen der Maße  $15 \times 15 \times 0,03 \text{ cm}^3$  mit einer Spitzenleistung von 3 W [10]. Unter Verwendung des Spezifischen Gewichtes für Silizium errechnet man, daß in der Solarzelle 15 g Silizium 3 W Sonnenlicht wandeln. Wir geben einen Zuschlag für den Sägeverschnitt von 180 im dazu. Damit erhöht sich die Siliziummenge der Solarzelle auf 24 g. Hochgerechnet auf 1 kW Solarzellenleistung, benötigen wir 8 kg Silizium, das zuvor mit 8000 kWh Energie zu gegossenen Blöcken verarbeitet worden ist. Mit der Annahme von 1000 Sonnenstunden im Jahr – in Süddeutschland nicht untypisch – und deren Nutzung zu 70% (entspricht näherungsweise der Sonnenbewegung relativ zum nach Süden ausgerichteten Solargenerator), „ernten“ wir über ein Jahr 700 kWh Sonnenenergie. Um die eingesetzte Energie von 8000 kWh wiederzugewinnen, bedarf es dann eines Zeitraumes

von elfeinhalb Jahren, der *Energierücklaufzeit*. Auf unterschiedliche Weise ermitteln zahlreiche Analysten der Photovoltaik ähnliche Werte [2]. Bei der Veranschlagung eines kompletten Solarzellen-Modules erhöht sich der Wert um etwa 10%. Die Energierücklaufzeit ist von hohem Interesse, wenn es um ihren Vergleich mit der technischen Lebensdauer von Solarzellen-Modulen geht. Die Erfahrung zeigt, daß man i.a. mit einer Lebensdauer von 20 Jahren rechnen kann. Die Energiebilanz ist also positiv. Für Dünnschichtzellen aus amorphem Silizium sinkt die Energierücklaufzeit auf unter vier Jahre. Wenn – wie angestrebt – das hochbeständige Silizium der ausgedienten Photovoltaik-Module ein zweites Mal zu Solarzellen verarbeitet wird, wird für derartige Module die Energierücklaufzeit auf Bruchteile der bisherigen sinken. Ergänzend sei angemerkt, daß eine derartige Verrechnung des Energieeinsatzes erst seit dem terrestrischen Einsatz der Photovoltaik üblich ist. Kaum zuvor ist der Energieaufwand für die Errichtung von Standard-Kraftwerken veranschlagt worden, z.B. für die Herstellung der Stahlträger, des Betons, der Turbinen und – beim Kernkraftwerk – der Brennstäbe.

### Chalkopyrit-Solarzellen, eine Alternative zum Silizium?

Im Vergleich zum Material- und Energie-Aufwand beim Silizium bieten Solarzellen aus Chalkopyrit-Material einige Vorteile. Hier handelt es sich um Verbindungshalbleiter aus der VI. und der II. Spalte des Periodensystems. Zunächst erforschte man Cadmiumsulfid/CdS, das bereits im weniger reinen Zustand mit einer preiswerten Dünnschicht-Technologie gute Wirkungsgrade von 12 – 15 % ergibt, allerdings unter Inkaufnahme des toxischen Elementes Cadmium. Trotzdem entwickelte man diese CdS-Solarzellen bis zur industriellen Fertigung (Siemens Solar, Antec Solar u.a.), ohne daß sie bislang den Markt der Silizium-Solarzellen gefährden konnten. Hier spielt der Verstoß gegen das Nachhaltigkeits-Kriterium *Toxizität* eine große Rolle, das die Kundschaft der Photovoltaik sehr wohl beachtet. Neuere Entwicklungen zeigen, daß man den Cd-Anteil der Chalkopyrit-Zellen bis auf Nanometer-dünne Zwischenschichten verringern kann, wenn man CIS- oder CIGS-Solarzellen baut [8], die aus einem Gemisch von Cu(In, Ga)(S,Se) bestehen und gute Wirkungsgrade in preiswerter Industrie-Technologie ergeben (Würth Solar). Es gibt Hoffnungen, den Cd-Anteil insgesamt durch Zink zu ersetzen.

Nach alledem entsteht der Eindruck, daß die Solarzellen heute immer noch ein Produkt für wohlhabende Enthusiasten sind. Soweit es um eine netzgekoppelte Betriebsweise geht, ist dieser Eindruck richtig. Allerdings zeigt die Entwicklungskurve der letzten 20 Jahre, daß sich allein durch die jährliche Marktausweitung der Preis der Anlagen ste-

## Der heutige Stand terrestrischer Solarzellen

Abb. 4 zeigt eine *DSL-G-BC-Solarzelle* (engl. double-sided laser grooved buried contact), die von M.S.Green und Mitarbeitern Anfang der 90er Jahre entwickelt wurde und die bis heute die Standard-Technologie der kristallinen Silizium-Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad bestimmt [7]. An Vorder- und Rückseite befinden sich die Kontakte in laser-geschnittene Gräben versenkt. Beide Oberflächen sind nach einer Strukturätzung aufgeraut, um „Lichtfallen“ zu bilden. Abschließend wird durch eine dünne dielektrische Schicht („oxide“) entspiegelt. Zu beiden Oberflächen hin ist die Dotierung des Halbleitermaterials hochgezogen, um niederohmige Übergänge zu den Kontakten zu erhalten. Vielfach werden die Rückseiten-Kontakte – ähnlich wie an der Vorderseite – nur punk-

weise angebracht. Die restliche Fläche wird durch dielektrische Beschichtung, meist Siliziumnitrid, passiviert. Im Labor werden damit *Wirkungsgrade* über 20% erreicht, in der Massenfertigung mit polykristallinem Silizium bis zu 16%.

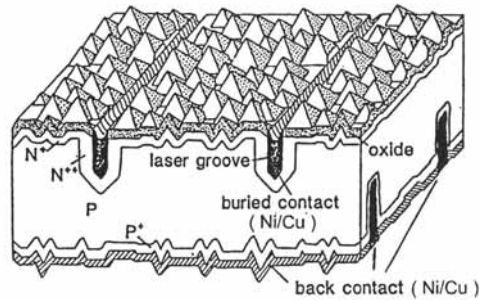


Abb. 4

tig verringert hat auf den Wert von derzeit 6,00 Euro/W. Insofern könnte man sagen: „wenn unsere Enkel davon profitieren sollen, müssen wir bereits heute Solarzellen kaufen.“

### Dient die Photovoltaik bereits heute der Verbesserung des menschlichen Lebens?

Nicht allein für den Markt der Industrieländer werden Solarzellen entwickelt und produziert. Eine große Bedeutung haben sie in den ariden Gebieten der Welt, wo in Oasen der Wüste kleine bäuerliche Siedlungen fern vom Netz existieren. Die erste Aufgabe ist dort stets, Mensch und Tier aus Tiefbrunnen mit Wasser zu versorgen. Solarbetriebene Druckpumpen holen z.B. in der Sahara Wasser aus 60 m Tiefe. Damit hat man Menschen – meist Frauen – von einer inhumanen Arbeit befreit. Darüberhinaus bringt die Elektrizität neue Anbauflächen für Obst und Gemüse und ermöglicht über das Schulfernsehen den Unterricht der Kinder und im solarbetriebenen Kühlschrank die Aufbewahrung von Medikamenten gegen Infektionen und Schlangenbiß. In der Sahara, der Kalahari und im Dschungel Indonesiens erweisen sich die Solarzellen als Bedingung für ein besseres Leben, über das Fernsehen als Verbindung zur modernen Welt. Erste Montagebetriebe für Photovoltaik-Module gibt es in Algerien, erste Fabriktionen in China und Indien. Die Photovoltaik-Weltkonferenz in Osaka 2003 zeigte, wie begeistert in asiatischen Ländern wie China, Vietnam und Malaysia die Chancen der Solartechnik aufgenommen werden, und daß wir in Deutschland diese neue Technik nicht nur hinsichtlich ihrer Konkurrenzfähigkeit zu anderen Energieträgern bei uns beurteilen sollten. „Let us share the benefits of solar power you have been al-

ready enjoying for years“, so äußerte sich im Mai 2003 ein vietnamesischer Konferenz-Teilnehmer in Osaka. Hat er nicht Recht?

### Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Hans-Günther Wagemann  
Technische Universität Berlin  
Elektrotechnik und Informatik  
Institut für Hochfrequenz- und Halbleiter-System-  
Technologien  
Einsteinufer 19  
10587 Berlin

### Literatur

- [1] B. Authier „Polycrystalline Silicon with Columnar Structure“, Festkörperprobleme XVIII (1978), 1-18
- [2] J. Bernreuter „Mehrfache Ernte“, Photon, Dezember 2003, 49-52
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit „Erneuerbare Energien und nachhaltige Entwicklung“, Berlin April 2002
- [4] Erneuerbare Energien Gesetz / EEG, Novelle v. 7.11.03
- [5] H. Fischer „Silicon Solar Cells from Polycrystalline Material“, Wiss.Ber.AEG-TELEFUNKEN 51(1978), 85-90,
- [6] M.A.Green „Third Generation Photovoltaics“, Springer Verlag 2003-12-16
- [7] M.A.Green et al., „High Efficiency Silicon Solar Cells“, Proc 20th IEEE Spec. Conf. New York 1990, p. 207 u.f.
- [8] J. Klaer, et al., „Efficient  $\text{CuInS}_2$  Thin-Film Solar Cells prepared by a Sequential Process“, Semicond. Sci. Technol. 13(1998), 1456 – 1458,
- [9] G.L.Pearson „Conversion of Solar to Electrical Energy“, Am.J.Phys.25(1957), 591-598
- [10] Q-Cells Thalheim, Data sheet Q6, März 2003
- [11] Sarasin Studie PV 2001, C. Butz „Markt, Akteure und Prognosen“, November 2003
- [12] H.G. Wagemann, H. Eschrich, „Grundlagen der photovoltaischen Energiewandlung“, Teubner Studienbuch, Stuttgart 1994