

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 78 (1987)

**Heft:** 6

**Artikel:** Photovoltaische Dünnschichtzellen : der grosse Aufschwung

**Autor:** Maag, W.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-903841>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 17.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Photovoltaische Dünnschichtzellen – der grosse Aufschwung

W. Maag

**1986 wurden weltweit Dünnschicht-Solarzellen mit einer Leistung von rund 11 MW hergestellt; damit ist der Dünnschichtanteil an der gesamten Solarzellenproduktion innerhalb von nur drei Jahren von 14 auf 37% angewachsen. Der geplante rasche weitere Ausbau der Produktionskapazitäten deutet darauf hin, dass diese Zellen in den nächsten Jahren bedeutende Absatzmärkte finden werden. Wird es im Zuge dieser Entwicklung auch gelingen, das ambitionierte Ziel einer Kostenreduktion auf ein Niveau von 1 \$ pro Watt bei Wirkungsgraden von über 10% zu erreichen?**

**La production mondiale de cellules photovoltaïques à film mince a représenté en 1986 une puissance totale d'environ 11 MW. La part du film mince sur l'ensemble de la production de cellules photovoltaïques est ainsi passée de 14 à 37% en l'espace de trois ans seulement. L'expansion rapide des capacités de production envisagée montre que ces cellules trouveront ces prochaines années d'importants débouchés. Sera-t-il également possible, dans le cadre de cette évolution, d'obtenir une réduction des coûts à un niveau de 1 \$ par watt, et ce pour des rendements de 10% et plus?**

## Adresse des Autors

Willi Maag, dipl. El.-Ing., Fabrimex AG,  
Kirchenweg 5, 8032 Zürich

## 1. Wie es begann

Seit es 1954 in den amerikanischen Bell-Laboratorien erstmals gelang, Solarzellen auf der Basis hochreinen, kristallinen Siliziums herzustellen, hat sich aus diesen Laboranfängen eine eigenständige Industrie entwickelt, deren Wachstumsraten in den nächsten Jahren kühnste Erwartungen übertreffen dürften.

Waren es am Anfang fast ausschliesslich Satelliten, die sich dieser neuen Stromerzeugungstechnik bedienten, so sind es heute unzählige terrestrische Anwendungen, deren Stromversorgung ausschliesslich auf Licht und Sonnenstrahlung ausgerichtet ist. Die Spanne erstreckt sich von professionellen Anwendungen, wie Senderspeisungen, Wasserpumpenanlagen, über Lichtversorgung von Ferienhäusern hin zu Taschenrechnern oder grossen MW-Kraftwerken, die ins öffentliche Netz einspeisen.

Doch – so unerschöpflich die Sonne als Energielieferant auch sein mag – die hohen Kosten für die Aufbereitung des reinen, kristallinen Siliziums, die aufwendigen Herstellungsprozesse und die teuren Verpackungstechniken setzten der weiteren Verbreitung der Photovoltaik bisher natürliche Grenzen.

Alle grossen Hersteller, wie Arco Solar, Solarex in den USA, Siemens und AEG in Deutschland, Sanyo und Sharp in Japan, erkannten daher schon in den frühen 80er Jahren, dass für eine wirkliche Verbreitung der Photovoltaik Herstellungspreise nötig wären, die sich mit herkömmlichen, monokristallinen Techniken nicht erreichen lassen. Zwar glaubten einige Firmen, mit polykristallinem Silizium eine Stufe weiter zu kommen. Die Hoffnungen haben sich aber in keinem Fall erfüllt. Soll Solarstrom je mit Strom aus Wasser- oder Kernkraftwerken in Konkurrenz treten können, so müssen die Herstellungskosten einer Zelle pro Watt erzeugbarer Leistung

auf ein Niveau von etwa einem Dollar gesenkt werden können. Mit kristallinem Material – so erkannte man bei Arco Solar schon 1981 – würde man nie unter zwei Dollar kommen.

Man begann daher intensiv an der Entwicklung von Dünnschichtzellen zu arbeiten, bei denen nur noch hauchdünne Schichten ausgewählter Halbleitermaterialien auf einen billigen Träger, wie Metall, Glas, Keramik oder Kunststoff, aufgedampft werden. Durch sinnreiche Verfahrensschritte lässt sich bei dieser Technologie auch die Serieschaltung einzelner Flächenelemente zur Erhöhung der Ausgangsspannung in einem monolithischen Prozess bewerkstelligen.

Nachfolgend soll versucht werden, den heutigen Entwicklungsstand abzuschätzen und die verschiedenen, bekannten Dünnschichttechnologien einander gegenüber zu stellen.

## 2. Ambitiöse Zielsetzungen

Sieht man von kleinen Zellen für Rechner und Uhren ab, wo Wirkungsgrad und Kosten pro Watt eine untergeordnete Rolle spielen, dürfte das erstrebenswerte Fernziel aller potentieller Hersteller die Produktion grossflächiger Zellen mit einem Wirkungsgrad von 15% oder mehr sein. Parallel dazu muss aber – wie bereits erwähnt – eine Kostenreduktion bis hinunter auf das Niveau von 1 Dollar pro Watt einhergehen. Eine sehr ambitionierte Zielsetzung, wenn man die extrem komplexen Technologien betrachtet, die für die Produktion von Dünnschichtzellen nötig sind. Der oftmals verwendete Ausdruck «High Tech» ist hier wirklich zutreffend.

## 3. Eigenheiten von Dünnschichtzellen

Dünnschichtzellen weisen Schichtdicken von selten mehr als wenigen Mi-

**Wer ist wer in der Photovoltaik?**

1985 betrug der Weltumsatz aller Photovoltaikhersteller etwa 170 Millionen, 1986 jedoch bereits 250 Millionen Dollar. Bis zum Jahr 1990 prognostizieren die Marktforscher bei stark fallenden Preisen einen Anstieg auf 480 bis 500 Millionen Dollar. Während heute etwa 60% aller Zellen für Heimelektrik, Pumpanlagen und Kommunikationssysteme eingesetzt werden, finden weitere 10% den Weg in grosse 100-kW- und Megawatt-Solarkraftwerke, und erst etwa 30% entfallen auf den Consumermarkt (Rechner, Uhren, Gadgets usw.). Bis 1990 erwartet man einen Anstieg des Consumeranteils auf 50%. Von der 1986 insgesamt produzierten 29,9-MW-Spitzenleistung entfielen rund 45% auf japanische Firmen wie Sanyo, Fuji, Sharp, Kyocera und Hoxan. 35% stammten aus amerikanischer Produktion, und zwar hauptsächlich von Arco Solar, Solarex, Solec, Mobil-Tyco, Solavolt, EDC und Chronar. Doch stellte Arco Solar mit rund 6 MW (20% des Weltmarktes) nach wie vor annähernd doppelt so viel her wie der nächste Anbieter. Die restlichen 20% verteilen sich auf AEG und Siemens in Deutschland, Photowatt in Frankreich, Helios und Ansaldo in Italien, BP in Australien sowie weitere kleinere Firmen.

Nicht in den Statistiken erfasst wurde bis jetzt die Photovoltaikproduktion in Indien und im Ostblock. Für Indien liegen Schätzungen von etwa 1,5 MW/Jahr vor, während über die Oststaaten keine Zahlen zugänglich sind.

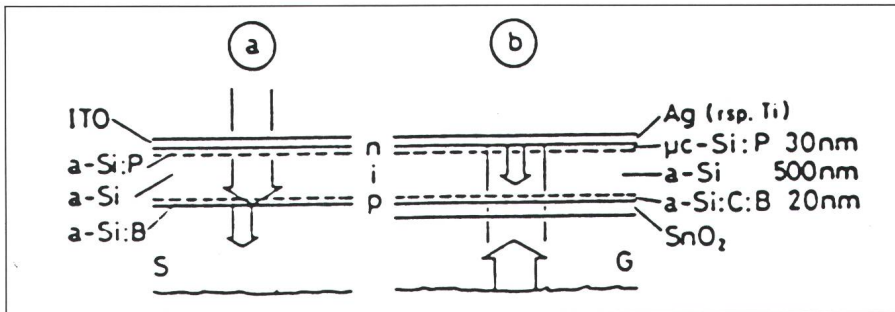
Betrachtet man nur die Dünnschichtszene, so sehen die Verhältnisse völlig anders aus. 1983 betrug der Dünnschichtanteil weltweit erst 14%; 1986 ist er mit rund 10,8 MW bereits auf 37% angewachsen. Marktleader mit total etwa 9 MW waren die Japaner Sanyo und Fuji, der Rest entfiel mit 1,5 MW auf die Amerikaner Arco Solar, EDC und Chronar. Europäische Firmen waren leider erst mit 0,3 MW dabei, obwohl sowohl bei Siemens, AEG und MBB, zusammen mit der französischen Solems SA, stark in Richtung Dünnschichttechnik geforscht wird. Weltleader in der Erzeugung grosser Zellenflächen bis 60x120 cm und Wirkungsgraden über 6% ist zurzeit eindeutig Arco Solar. Die Firma ist gegenwärtig daran, die Jahresfertigungskapazität auf 5 MW zu erweitern.

Die Verhältnisse werden sich mit Sicherheit in den nächsten Jahren laufend verändern. Insbesondere Japan dürfte bemüht sein, auch bei grossflächigen, hocheffizienten Zellen eine bedeutende Marktstellung einzunehmen. Mit Gewissheit steht aber schon heute fest: Firmen, die nicht über eine ausgereifte und stabile Dünnschichttechnologie verfügen, werden in einem künftigen Markt mit herkömmlichen kristallinen Zellen keine Chance mehr haben und früher oder später verdrängt werden.

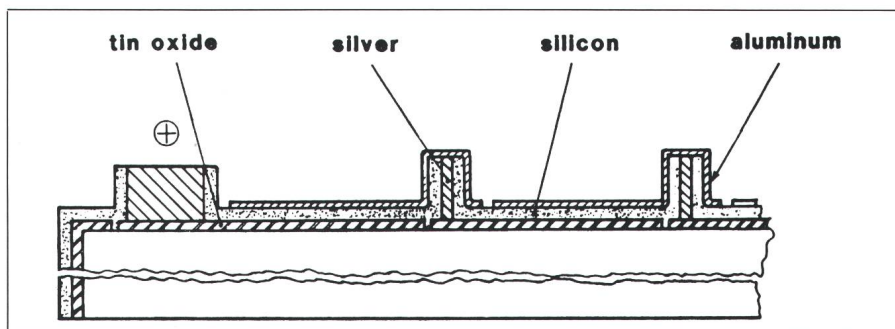
krometern auf, im Gegensatz zu kristallinen Zellen, die meist – schon aus Stabilitätsgründen – 0,2-0,3 mm dick sind (Fig. 1). Dünnschichtzellen benötigen somit nicht nur über 100mal weniger Basismaterial, sie nützen es auch um Zehnerpotenzen besser aus. Auftreffende Photonen haben einen kürzeren Weg, um zur Sperrschicht vorzudringen, und die Leitungsband-Elektronen finden einen niedrigeren Bahnwiderstand auf ihrem Weg zur Kontaktierung.

Dünnschichtzellen lassen sich aus einer Reihe verschiedener Materialien herstellen. Im Vordergrund steht in jedem Fall das amorphe (nicht kristalline) Silizium; aber auch Cadmium-Tellurid, Cadmium-Sulfid, Gallium-Arsenid und Kupfer-Indium-Diselenid sind erfolgversprechende Kandidaten. Bereits 1986 wurden weltweit für 10,8 MW Spitzenleistung Dünnschichtzellen hergestellt. Der weitaus grösste Teil entfiel allerdings auf die in Dutzende von Millionen gehenden kleinen Rechner- und Uhrenzellen aus japanischer Fertigung. Diese begnügen sich grösstenteils mit Wirkungsgraden von 2-3% und haben auch bezüglich Langzeitstabilität keinen grossen Anforderungen zu genügen. Den ersten bedeutenden und wichtigen Schritt nach vorne machte im Spätherbst 1984 die amerikanische Öl-Multi-Tochter Arco Solar mit der Einführung des ersten echten Leistungspanels mit über 6% Wirkungsgrad und einer Fläche von 30x30 cm (Fig. 2). Die internationale Fachpresse feierte damals diesen Markstein mit vielen optimistischen Artikeln; aber man war sich klar, dass bis zum Erreichen der ambitionierten 15%-Zelle noch ein weiter Weg zu gehen sei. Inzwischen wird aus Japan und den USA vermehrt über Zellen mit 10-12% Wirkungsgrad berichtet, auf dem offenen Markt liegen aber die erhältlichen Werte nach wie vor kaum höher als 7% (Fig. 3).

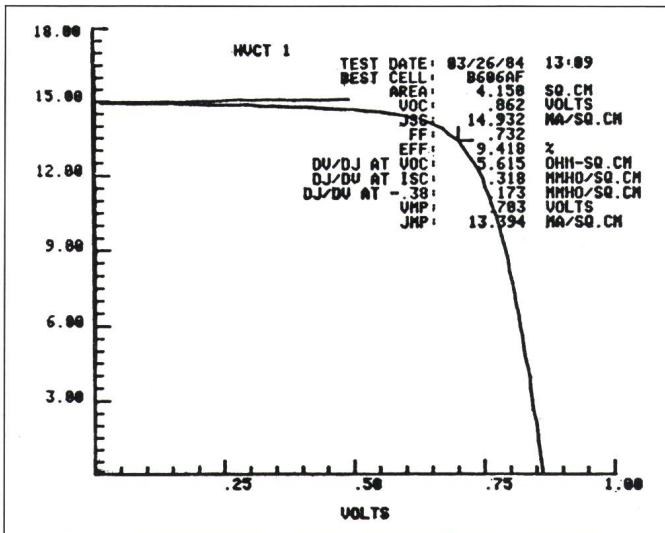
Ein Grund für das schlechte Abschneiden von Dünnschichtzellen gegenüber kristallinen Zellen – dort sind immerhin heute Wirkungsgrade zwischen 10-15% an der Tagesordnung – hängt mit dem relativ schmalen Ansprekspektrum der Dünnschichtmaterialien zusammen. Jedes Halbleitermaterial wird gekennzeichnet durch eine ganz bestimmte Energieschwelle, ab welcher auf die Oberfläche auftreffende Photonen (Lichtquanten) in der Lage sind, Valenzband-Elektronen aus ihrem geordneten Atomverband herauszuschlagen und ins Leitungs-



**Figur 1 Aufbau amorpher Dünnschichtzellen**  
a Zelle auf Stahlsubstrat b Zelle auf Glassubstrat



**Figur 2 Aufbau eine Si-Dünnschichtzelle von Arco Solar (G100, G4000)**



**Figur 3**  
*I/U-Kennlinie einer experimentellen Si-Dünnschichtzelle von Arco-Solar. Füllfaktor: 0,73; Wirkungsgrad: 9,4%*

verschiedener Zellentypen viele Probleme mit sich bringt. Zum Beispiel müssen die Prozesse so gesteuert werden, dass jede der in Serie liegenden Zellen unter dem noch durchdringenden Restlicht genau den gleichen Strom zu produzieren vermag. Bei Ungleichheit bestimmt natürlich die schwächste Zelle den Gesamtstrom. Auch geringste Abweichungen des Spektralgehalts der auftreffenden Strahlung führen sofort zu ins Gewicht fallenden Stromschwankungen.

Ein weiteres Problem: Jede Sperrschicht muss bei einer jeweils tieferen Temperatur als die vorhergehende erzeugt werden, sollen nicht die schon deponierten Zonen wieder zerstört oder wenigstens degradiert werden. Diese Schwierigkeiten können umgangen werden, wenn solche Mehrfachzellen, oder zumindest Tandemzellen, jede für sich in optimierten Herstellungsverfahren produziert und erst hernach mittels eines optischen Kopplers miteinander verbunden werden. So hat z. B. die Firma Arco Solar schon 1985 an verschiedenen Photovoltaik-Kongressen ihre Absicht bekundet, ihr Forschungsschwergewicht künftig in Richtung Tandemzelle zu verlegen. Die Gründe hierfür sind inzwischen in vielen Forschungsberichten mit erstaunlich vielen Details belegt worden.

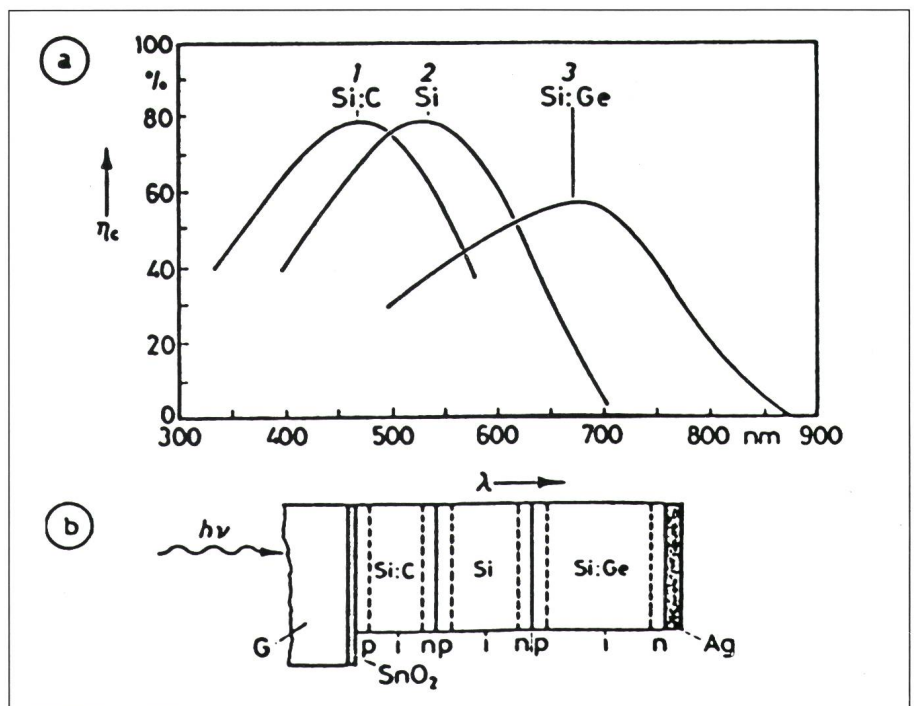
band hinaufzuheben. Oberhalb dieser kritischen Schwelle verfügt jedes Material über eine sog. Energiebandlücke, innerhalb welcher es zum beschriebenen photovoltaischen Effekt kommen kann. Photonen mit mehr oder weniger Energie – sie wird in eV (Elektron-Volt) ausgedrückt – verpuffen nutzlos.

Amorphes Silizium hat eine hohe Energiebandlücke von 1,7 eV und spricht demnach erst ab Lichtwellenlängen von etwa 720 nm (rot) bis hinauf zu 320 nm (UV-A) an, arbeitet also im wesentlichen nur im sichtbaren Spektrum. Die höchste Ansprechempfindlichkeit liegt bei etwa 550 nm (grün). Kristallines Silizium hat demgegenüber eine Energiebandlücke knapp über 1,1 eV, ein Ansprechband von 1100 nm bis 400 nm und einen Scheitelwert um etwa 850 nm. Als Folge der verschobenen Energiebandlücken verhalten sich die Leerlaufspannungen umgekehrt proportional zu den Scheitelwertfrequenzen, also etwa 0,58 V beim kristallinen zu 0,82 V beim amorphen Typ.

Durch Legieren von amorphem Silizium mit anderen ausgewählten Materialien kann man die Lage der Energiebandlücken verschieben und auch verbreitern. Mit anderen Worten, es lässt sich mehr des energieintensiven Teils der Solarstrahlung einfangen. So sind z. B. bei Siemens und der amerikanischen Firma ECD (Energy Conversion Devices) Zellen gebaut worden, bei denen 2 und 3 aktive Schichten hintereinander bzw. aufeinander zu liegen kommen. Eine jede dieser Schichten (PIN-Übergänge) wurde auf eine begrenzte Energiebandlücke abgestimmt, so, dass alle zusammen das

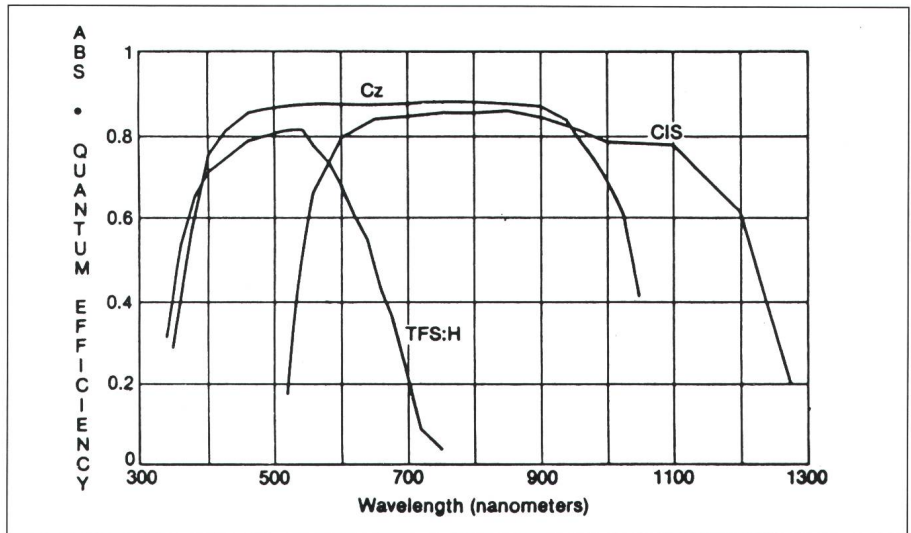
ganze Solarspektralband abdecken (Fig. 4). In der obersten, der Strahlung ausgesetzten Zone wurde hauptsächlich Kohlenstoff zulegiert, was die Energiebandlücke ins Blau/UV-Licht hinaufhebt. In den hinteren Zonen liess sich durch Einlegieren von Germanium eine Frequenzverschiebung nach unten erreichen, womit die von der vorderen Schicht durchdringende Rotstrahlung besser ausgenutzt wird.

Nun hat sich aber gezeigt, dass eine solche monolithische Serieschaltung



**Figur 4** (a) Einfluss von Zulegierungen auf die Lage der Energiebandlücken  
 C Kohlenstoff Ge Germanium  
 (b) Aufbau einer Trippel-Zelle mit etwa 2,5 V Ausgangsspannung

Die Arco-Solar-Tandemzelle setzt sich grundsätzlich aus zwei separat hergestellten, aus je einer Glasplatte bestehenden Dünnschichtzellen zusammen, die mittels bekannter Techniken miteinander laminiert werden. Die vordere, der Sonne zugewandte Scheibe erhält auf ihrer Hinterseite zuerst eine transparente, elektrisch leitende Zinnoxidschicht. Dann folgt ein P-I-N-Aufbau dünner Siliziumschichten und als Abschluss eine elektrisch leitende, ebenfalls transparente Rückbeschichtung aus Zinkoxid. Letztere wird in ihrer Schichtdicke auf optimale Transmission der längerwelligen Lichtstrahlen im Bereich von 550 bis etwa 1300 nm getrimmt. Die hintere Zelle erhält als oberste Zone ebenfalls eine lichttransparente Zinnoxidschicht. Darunter findet sich eine dünne Zone Cadmium-Sulfid auf einer dickeren Zone Kupfer-Indium-Diselenid. Als hintere Zellenkontaktierung dient eine lichtundurchlässige Beschichtung aus Molybdän, die direkt auf den Glasträger aufgedampft wird. Jede der beiden Platten wird nun mit einer Anzahl einzelner Zellenfelder besetzt, die dem umgekehrten Verhältnis der optimalen Zellenarbeitsspannungen entsprechen. Amorphes Silizium erbringt bei optimaler Anpassung etwa 0,6 V, Kupfer-Indium-Diselenid etwa 0,38 V (Leerlaufspannungen 0,82 bzw. 0,485 V). Werden die beiden Platten mittels der schon erwähnten Lichtkopplerfolie zusammenlaminiert und elektrisch parallel geschaltet, so entsteht eine Tandemzelle, deren Silizi-



Figur 6 Spektrale Ansprech-Empfindlichkeit von: TFS Dünnschicht-Silizium CIS Dünnschicht CuInSe<sub>2</sub> Cz kristallinem Silizium  
Quelle: Arco Solar

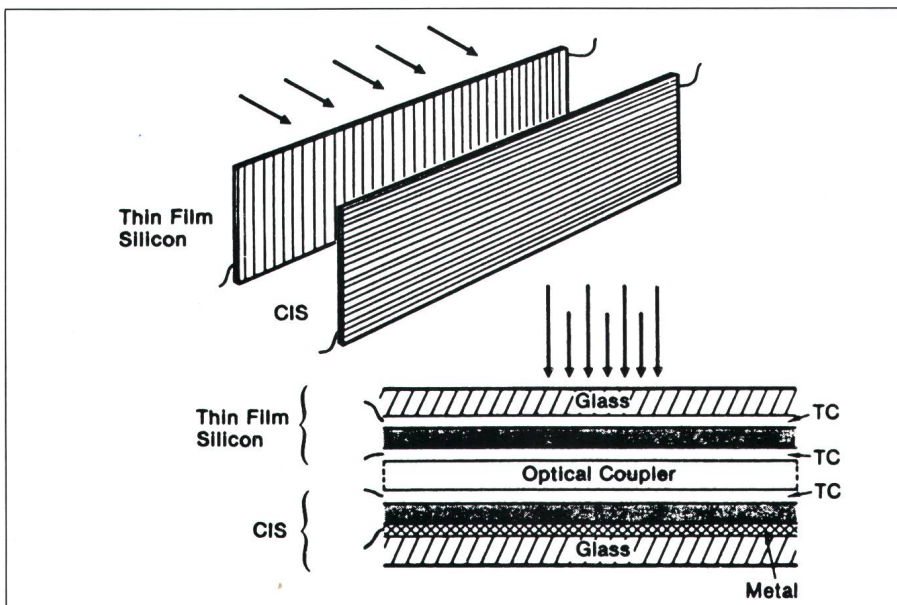
um- und Kupfer-Indium-Diselenid (CIS)-Zellen jederzeit im optimalen Arbeitspunkt betrieben werden können. Spektrale Verschiebungen des auffallenden Lichts haben nun keinen negativen Einfluss mehr; die einzelnen Teilströme addieren sich in jedem Fall (Fig. 5 und 6).

Bereits im Herbst 1986 sind von Arco Solar an 65 cm<sup>2</sup> grossen Tandemzellen 14% Wirkungsgrad gemessen worden. Es wird angenommen, dass man inzwischen dem Ziel grossflächiger Elemente bereits wesentlich nähergekommen ist. Trotzdem dürfte es noch gut zwei Jahre dauern, bis an

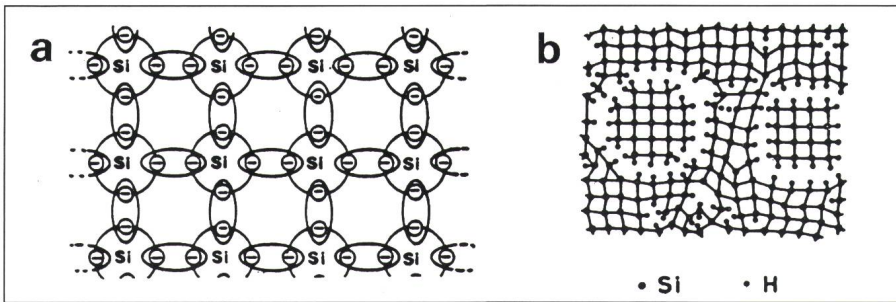
eine breite Ablösung der klassischen kristallinen Zellen gedacht werden kann. Denn so einfach sich die Funktionsweise der Tandemzelle beschreiben lässt, so komplex sind die zur Herstellung nötigen Technologien. Einige Teilaspekte werden an späterer Stelle behandelt.

Andere Firmen suchen nach Möglichkeiten, einschichtige Dünnschichtzellen auf höhere Wirkungsgrade zu bringen. So hat Sanyo (JP) 11,5% Wirkungsgrad mit einer Zelle erreicht, deren Oberfläche durch chemisches Texturieren lichtaufnahmefähiger gemacht wird, während die untere Zellenkontaktierung, bzw. die hintere Kontaktierung, verspiegelt wird. Auf diese Weise kann Licht, anstatt wieder abgestrahlt zu werden, durch Totalreflexionseffekte im System gefangen und quasi mehrmals ausgenutzt werden.

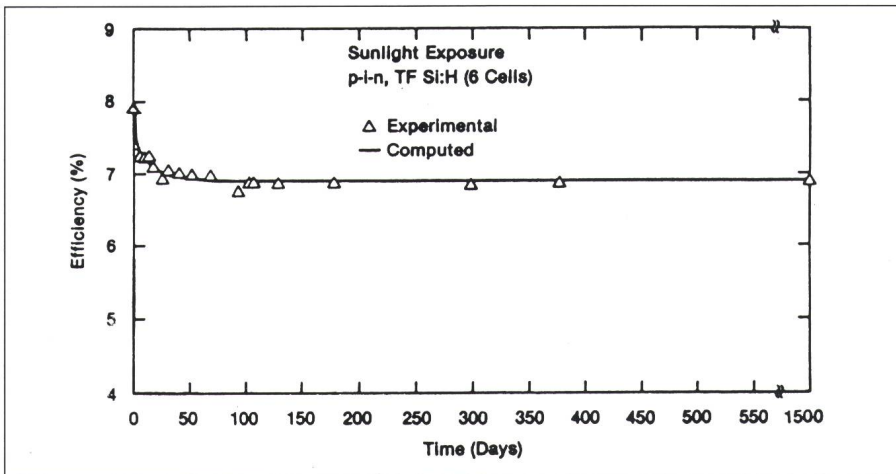
Von Solarex, heute Tochter des Ölmultis Amoco, wird eine Zelle mit 10,4% Wirkungsgrad beschrieben, bei der alternierende Lagen extrem dünner Schichten von unterschiedlich legiertem Silizium (d.h. mit verschobenen Energiebandlücken) unmittelbar unter der Zellenoberfläche aufgebracht wurden. Waren diese erstaunlich hohen Wirkungsgrade für einschichtige Zellen ursprünglich nur in einigen cm<sup>2</sup> oder noch weniger realisierbar, so werden heute Werte bis gegen 9%, wenn auch noch nicht kommerziell erhältlich, von verschiedenen Firmen für Flächen von 1 Quadratfuß oder grösser gemeldet. Doch von welchem Wirkungsgrad ist da normalerweise die Rede? Speziell amorphe Sili-



Figur 5 Aufbau der Tandemzellen von Arco Solar



Figur 7 Kristallstrukturen von: a kristallinem Silizium b Dünnsilium



Figur 8 Degradier- und Stabilisierverhalten von Arco-Solar-Si-Dünnsilium-Material. Echte Messresultate seit Januar 1983

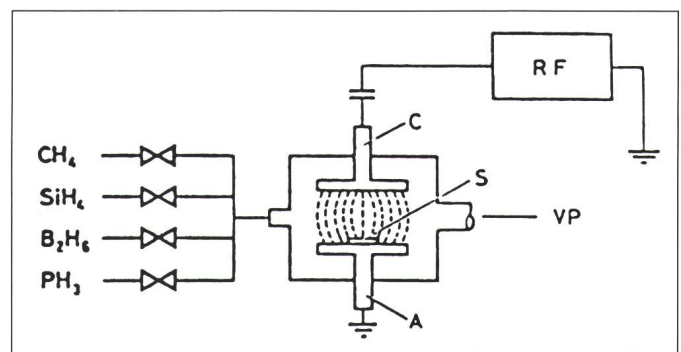
ziumzellen neigen leider dazu, nach kürzerer oder längerer Sonnenexposition nach einem quasi exponentiellen Verlauf zu degradieren. Erst nach einer bestimmten Zeit, meist innert weniger Tage bis Wochen, wird ein stabiler Zustand erreicht; gewisse Hersteller sprechen sogar von vollkommener Stabilität.

Die Gründe für das Degradieren scheinen auch heute noch nicht völlig geklärt zu sein. Verantwortlich gemacht wird vorwiegend der fundamentale Charakter amorphes Silizium. Während beim kristallinen Material jedes einzelne Atom fest mit vier anderen Atomen in einer diamantähnlichen Struktur verbunden ist, sind beim amorphem Silizium die Bindungen wesentlich schwächer. Die Atome sind hier eher in zufälligen Zusammenhängungen formiert, mit vielen offenen, ungesättigten Verbindungen (Fig. 7). Diese defekten Bindungen tendieren dazu, freie Elektronen einzufangen und damit den Strom in Richtung der Zellenkontakte zu reduzieren. Der Effekt scheint sich mit der Zeit noch zu verstärken, indem durch Photonen losgeschlagene Elektronen noch weitere Bindungen aufbrechen.

Andererseits erwärmt die Solarstrahlung die Zellen und beschleunigt damit die Absättigung offener Bindungen. Of-

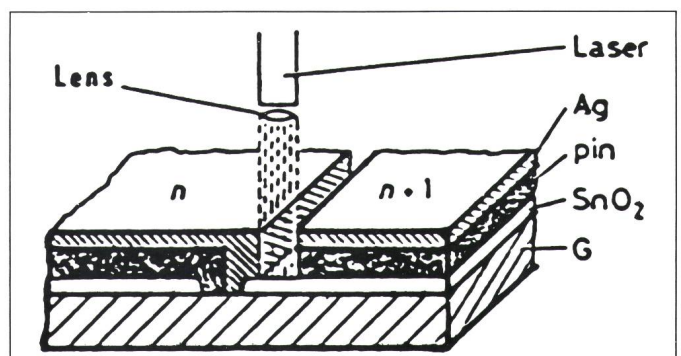
Figur 9 Herstellung dünner Schichten nach dem Glimmladungsverfahren

RF Hochfrequenz-generator  
C heizbare Kathode  
S Substrat  
VP Vacuumpumpe  
A heizbare Anode



Figur 10 Grostechnologische Bearbeitung von Dünnsiliumstrukturen zur Erzeugung serriegeschalteter Zellen mittels Laserstrahlen

G Glassubstrat



fensichtlich stellt sich mit der Zeit eine Stabilisierung ein, wenn der thermische Heilungseffekt den Aufbrecheffekt ausgleicht (Fig. 8).

Interessanterweise scheinen dünnere Zellen, wie sie z.B. für sog. «Indoor»-Anwendungen für Fluoreszenz-Lichtbetrieb hergestellt werden, weniger zur Degradierung zu neigen. Vermutlich, weil die Elektronen auf ihrem kürzeren Weg zur Kontaktierung weniger Chancen haben, eine offene Bindung zu treffen. Und wenn sie es doch tun, ist die Gefahr, eingefangen zu werden, infolge der höheren elektrischen Feldstärke in dünneren Schichten entsprechend geringer. Auch bei den vorgängig erwähnten Doppel- oder Tripelzellen scheinen die Degradierungseffekte dank den dünneren Schichten weniger ausgeprägt zu sein. EDC publizierte Messwerte von einer Tripelzelle, die nach mehrmonatigem Test immer noch 95% ihres ursprünglichen Wirkungsgrades von etwas über 10% gehalten hat.

#### 4. Herstellungsverfahren

Ein nicht einfaches Problem ist die Herstellung der dünnen Siliziumschichten, ob für Multijunction oder für Einfachzellen. Beim normalerweise verwendeten Prozess für Silizium-Dünnschichtzellen (Fig. 9 und 10)

wird Silan-Gas ( $\text{SiH}_4$ ) in einem Hochfrequenzfeld bei hohen Temperaturen aufgespalten und auf einem Substrat deponiert. Dieser Glimmentladungsprozess ist leider nicht nur langsam, er liefert auch immer wieder Defektstellen und damit Ausschuss. Alternative Verfahrenstechniken scheinen wohl das Geschwindigkeitsproblem zu lösen, verschlechtern aber die Qualität, oder umgekehrt. So wird z. B. versucht, den Prozess durch Verwendung von Disilan-Gas ( $\text{Si}_2\text{H}_6$ ) zu beschleunigen; es enthält doppelt so viel Silizium wie Silan, doch ist die kommerzielle Verfügbarkeit in konstanter Qualität scheinbar ein Problem. EDC berichtet von einer 20fachen Beschleunigung der Depositionsrate auf 0,01 Mikron pro Sekunde durch Erhöhen der Entladefrequenz in den Mikrowellenbereich. Aber auch hier sei die Defektrate noch sehr hoch.

Andere Firmen, wie Sanyo und Chronar, forschen in einer anderen Richtung. Sie untersuchen eine photochemische Dampfdeposition, bei der die Energie des Lichtes zur Erregung der Atome und Moleküle ausgenutzt wird. Das Verfahren gibt eine wesentlich verbesserte Qualität, ist aber nach wie vor langsam.

Diese Prozessprobleme waren es nicht zuletzt, die die Forscher zur Suche nach alternativen Materialien anregten. Als aussichtsreichster Kandidat hat sich das Kupfer-Indium-Diselenid ( $\text{CuInSe}_2$ ) erwiesen. Erste Zellen mit diesem Material wurden schon um 1980 bei Boeing hergestellt. Nicht nur ist CIS extrem stabil, es gilt gleichzeitig auch als das am stärksten lichtabsorbierende Material; über 99% des sichtbaren Lichts werden innert nur 0,5 Mikron Weglänge völlig absorbiert. Ein anderer Vorteil ist die lange Lebensdauer der durch Photonen generierten Elektronen, bevor sie im Valenzband rekombinieren. Dadurch erreicht eine grössere Zahl der durch Licht erzeugten Ladungsträger die Kontaktierung und erhöht somit den Ausgangsstrom. Mit einem unteren Ende der Energiebandlücke von nur 1 eV bleibt aber die Zellenspannung mit typisch 0,485 V bescheiden, was sich trotz höherem Strom negativ auf den Wirkungsgrad auswirkt.

Doch auch hier öffnen sich Verbesserungsmöglichkeiten. Durch Legieren mit Cadmium-Sulfid oder – wie man es bei Boeing versucht – mit Gallium hofft man, die Energiebandlücke auf 1,3–1,4 eV anzuheben, was dann zu Leerlaufspannungen um etwa 0,7 V

führen müsste. Doch der bisher verfolgte Fabrikationsprozess für CIS-Zellen ist reichlich komplex: Mindestens drei verschiedene Gase werden zur Formierung der Verbindung benötigt. Der Depositionsprozess muss in mehrmals repetierter Form ablaufen, und die Kontrolle der Dicke der aufgedampften Schichten verlangt extremes Know-how. Während Boeing mit ihrem fünf Jahre alten chemischen Aufdampfungsverfahren offenbar wenig Fortschritte macht, scheint Arco Solar einen weiteren Durchbruch geschafft zu haben. In einem Plasma-Depositions-Verfahren (reactive sputtering) wird ein Strom auf höchste Energie geladener Teile auf eine Sekundärelektrode (target) geschossen und aus diesem Kupfer- und Indiumatome losgerissen. Diese Atome werden durch ein Selen-Wasserstoff-Gas beschleunigt und setzen sich dann als  $\text{CuInSe}_2$ -Verbindung auf einem Substrat ab. Es scheint, dass Arco Solar mit dieser Technologie in der Lage ist, auch grossflächige Zellen zu erzeugen.

Ein weiteres Verfahren auf der Basis von galvanischer Metallabscheidung wird durch die Firma «International Solar Electric Technologies» (USA) beschrieben. Sie deponiert zuerst eine Kupferschicht auf ein Substrat und darauf eine weitere aus Indium. Diese Schichten lässt man mit Selen-Wasserstoffgas reagieren und gelangt so ebenfalls zu  $\text{CuInSe}_2$ ; allerdings sei die Prozesskontrolle extrem kritisch. Trotzdem ist es der jungen Firma bereits gelungen, 7% Wirkungsgrad zu erreichen.

Mit grosser Sicherheit kann angenommen werden, dass die meisten Dünnschichthersteller – wenn auch nach verschiedensten Verfahrenstechniken – an der Entwicklung von CIS-Zellen arbeiten. Es ist deshalb auch leicht verständlich, warum keine Firma allzu freigiebig mit Informationen über den erreichten Entwicklungsstand ist.

Ein weiteres, potentiell für Dünnschichtzellen geeignetes Material ist das Cadmium-Tellurid ( $\text{CdTe}$ ). Mit einer Energiebandlücke über 1,4 eV liegt es gut im Solarspektrum und ergibt mit rund 0,7 V auch eine brauchbare Leerlaufspannung. Es hat sich als extrem stabil erwiesen, und bereits hat man Zellen mit 11% Wirkungsgrad gebaut.

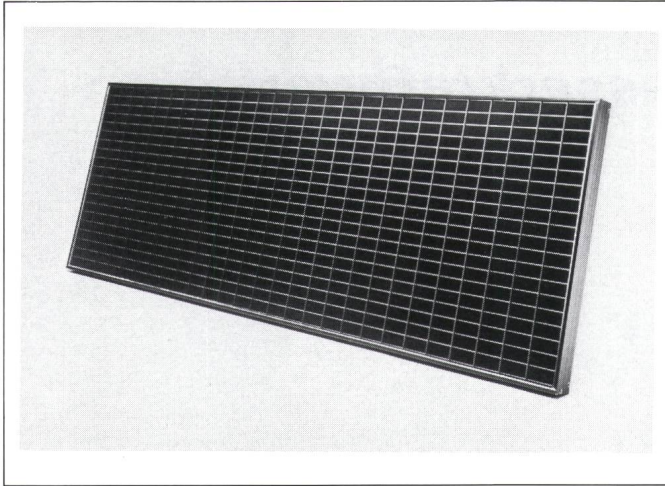
Ist somit  $\text{CdTe}$  das Ei des Kolumbus? Leider nein! Erstens werden für den Prozess 600–700 °C benötigt, was eine Anzahl möglicher preisgünstiger Substratmaterialien ausschaltet. Zweitens verlangt er eine extrem enge Kon-

trolle der Cadmium- und Telluranteile; Abweichungen von nur 1% entscheiden bereits, ob die  $\text{CdTe}$ -Schichten N- oder P-Charakter annehmen. Normalerweise wird eine Schicht  $\text{CdTe}$  als P-Typ deponiert und darauf eine transparente Cadmium-Sulfid-Schicht als N-Zone aufgebracht.

Einen anderen Weg ist man bei Arco Solar und der Southern Methodist University in Dallas gegangen. Statt N- und P-Zonen bereits beim Depositionieren der Schichten zu erzeugen, produziert man diese im nachhinein durch Dotierung mit Phosphor (N) oder Arsen (P). Obwohl Arco Solar damit 9,1% Wirkungsgrad erreicht hat, scheint man dort zurzeit keine Pläne für eine Kommerzialisierung zu verfolgen. Dagegen hat der ehemalige Gründer der heutigen Arco Solar, Bill Yerkes, 1986 versucht, mit seiner neu gegründeten Firma «Yerkes Electronic Solar» und einem 500-°C-Prozess die  $\text{CdTe}$ -Technologie weiter zu entwickeln. Mangels Venture-Kapital hat das Unternehmen aber unterdessen bereits Schiffbruch erlitten. Eigentlich nicht ganz unerwartet, ist doch der Kapitalbedarf für den Einstieg ins Dünnschichtgeschäft extrem hoch. Wer nicht über ein hochdotiertes Forschungsbudget verfügt, bleibt schnell auf der Strecke.

Es bleibt aber noch ein weiteres Material zu besprechen: das Gallium-Arsenid ( $\text{GaAs}$ ). Es wird seit langem – wie kristallines Silizium – von der Solarzellenindustrie für Hochleistungszellen eingesetzt, allerdings hauptsächlich für sogenannte konzentrierende Systeme mit bis zu hundertfacher Solarintensität. Zellen mit 23% Wirkungsgrad werden z. B. von Varian beschrieben. Mit einer Energiebandlücke bei 1,45 eV liegt  $\text{GaAs}$  ideal im Solarspektrum und liefert dennoch eine hohe Zellenleerlaufspannung von 0,75 V. Das Basismaterial ist zwar auch heute noch sehr teuer; gelingt es jedoch, dünne Schichten zu erzeugen, verliert dieses Argument seine Bedeutung.

Die Firma «United Technologies» in Hartford (USA) begann, einzelne, dünne  $\text{GaAs}$ -Kristalle auf einem billigen, löslichen Trägermaterial, gewöhnlichem  $\text{NaCl}$ -Kochsalz, abzuscheiden – ein leider sehr langsames und aufs Laboratorium beschränktes Verfahren. Andere Firmen versuchten sich mit Aufdampfen auf graphitbeschichtete Wolframträger bei Prozess-temperaturen von 1100 °C – zu hoch,



**Figur 11**  
30-W-Dünnsfilm-  
Modul von Arco  
Solar

Gebäude mehr Strom zu erzeugen, als darin im Mittel verbraucht wird.

Von Firmen wie EDC, Chronar und Sanyo weiss man, dass sie heute Fabrikationsstätten besitzen, um Dünnsfilmzellen in MW-Grössenordnungen herzustellen. Allen voran aber hat Arco Solar, zusammen mit den Joint-Venture-Partnern Showa-Shell in Japan und Siemens-Solar in Deutschland, dem Dünnsfilmzeitalter die Tore geöffnet. Bis Ende 1987 soll bereits eine Ausstossrate von 5 MW an grossflächigen Zellen erreicht werden. Und für die frühen 90er Jahre plant man mit beiden Partnern Fabriken für je 15 MW und eine eigene für 70 MW. Über allfällige Absatzprobleme bei einem dannzumaligen Produktionspreis um einen Dollar pro Watt scheint man sich keine Sorgen machen zu müssen.

um sich nicht eine Reihe anderer, unerwünschter Effekte einzuhandeln.

Tatsache ist, dass bis heute noch von keinem Hersteller echte Durchbrüche gemeldet worden sind oder gar käufliche Produkte angeboten werden.

### 5. Was bringt die Zukunft?

Auch wenn kommerziell erhältliche Dünnsfilmzellen im Vergleich zu den mit kristallinen Materialien erreichten Wirkungsgraden noch schlecht abschneiden, zeichnen sich doch für die nächsten Jahre bedeutende Absatzmärkte ab. So werden neben Rechnern und Uhren viele andere Geräte des täglichen Gebrauchs (Handbohrmaschinen, Leuchten, elektronische Kleingeräte) mit wiederaufladbaren Batterien oder sog. Superkondensatoren ausgerüstet werden. Hochempfindliche Dünnsfilmzellen können dazu dienen, diese Speicher auch mit Innenraumlicht stets geladen zu halten.

Dünnsfilmzellen können in transparenter Ausführung z. B als stromerzeugende

Boots- oder Automobildächer ausgestaltet werden (Fig. 11 und 12). Auch von photovoltaischen Glasfassaden und Gebäudeverkleidungen ist die Rede. Es wird möglich sein – selbstverständlich auch im Netzverbund über Synchronwechselrichter – in einem

#### Literatur

- Photovoltaik Insider's Report
- High Technology 7/86
- ARCO Solar Labor Reports

**Figur 12**  
Sonnendach als  
Dünnsfilm-Generator  
für ein Autodach zum  
Antrieb eines Belüf-  
tungsventilators

Die maximale Leistung wird bei maximaler Sonneneinstrahlung benötigt. Die breite Anwendung wird ab Modellreihe 1989/90 erwartet.

