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: 73 (1982)

Heft: 11

Artikel: Photovoltaische Energiegewinnung : Stand und Zukunftsaussichten

Autor: Bucher, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904968

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: 12.12.2025

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

BULLETIN
des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité

Elektrotechnik und Elektronik
Electrotechnique et électronique

Photovoltaische Energiegewinnung: Stand und Zukunftsaussichten

E. Bucher

621.383;

Nach einer kurzen Einführung in die physikalischen Vorgänge in einer Solarzelle werden die Solarzellen diskutiert: Silizium in allen seinen Varianten, CdS/Cu₂S, GaAs, sowie weitere wichtige Verbindungshalbleiter. Der heutige Zustand wird einer kritischen wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Analyse unterworfen. Daraus werden einige Konsequenzen für die mögliche Weiterentwicklung gezogen.

Après un bref exposé des phénomènes physiques dans une cellule solaire, l'auteur traite des cellules modernes au silicium, CdS/Cu₂S, GaAs ou autres composés semi-conducteurs importants. L'état actuel est soumis à une analyse critique du point de vue scientifique et économique et quelques-unes des conséquences pour de futurs développements sont indiquées.

1. Physik des Photovoltaeffektes

1.1 Einleitung

Unter dem Photovoltaeffekt versteht man die direkte Umwandlung von elektromagnetischer Strahlungsenergie in elektrische Energie. Dies ist nur mit Hilfe von Halbleitern möglich. Meist denkt man dabei an die Solarzelle, welche das Sonnenlicht in elektrische Energie umwandelt. Die ersten Solarzellen aus Si und CdS/Cu₂S[1]) wurden 1954 in den USA erprobt (*Chapin, Pearson* und *Fuller*, Bell Laboratorien bzw. *Reynolds, Seies, Antes* und *Marburger*). Man kann jedoch auch Strahlung ausserhalb des sichtbaren Bereiches direkt umwandeln, entweder im Infraroten oder im Ultravioletten bis hinein ins Röntgengebiet. Die Solarzelle ist somit nur ein Spezialfall des allgemeineren Photovoltadetektors, der speziell auf das Sonnenspektrum optimiert ist. Die physikalischen Vorgänge im Detektor sind jedoch grundsätzlich die gleichen.

Es ist nicht möglich, die zahlreichen physikalischen und technologischen Probleme im Bereich der Solarzellenforschung und -entwicklung ohne Grundkenntnisse über Halbleiter und Halbleiterdioden zu verstehen. Deshalb sei im 1. Teil das Wesentliche darüber zusammengefasst.

1.2 Halbleiter

Kristalline Festkörper zeigen sog. Energiebänder (Fig. 1); diese entsprechen den diskreten Energiestufen im Atom [1]. Zwischen ihnen liegen «verbotene» Zonen, d.h. Energien, welche die Elektronen aufgrund der Kristallsymmetrien nicht einnehmen können. In einem idealen Halbleiter ist bei tiefen Temperaturen ein Energieband ganz mit Elektronen aufgefüllt und das nächsthöhere Band ganz leer. Das verbotene Zwischengebiet E_g heisst Energielücke des Halbleiters und äussert sich in dessen Absorptionskonstanten (Fig. 2). Sie ist für Solarzellen eine der grundlegenden Grössen. Im Gegensatz zu einem Metall fällt im Halbleiter der elektrische Widerstand ϱ exponentiell mit der reziproken absoluten Temperatur T ab: $\varrho = A \exp(E_g/2\,kT)$, mit k = Bolzmannsche Konstante.

Halbleiter reagieren in bezug auf Leitfähigkeit empfindlich auf Verunreinigungen. Wegen der 4-Wertigkeit von Si und

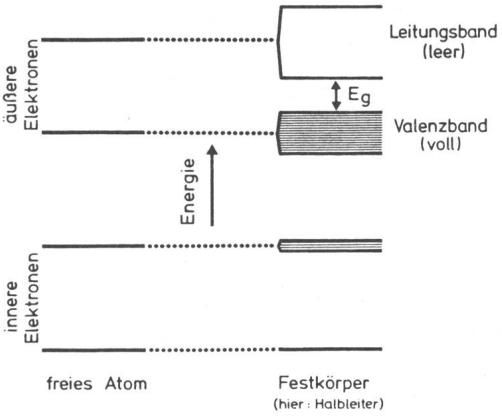

Fig. 1 Darstellung des Energieschemas freier Atome und daraus gebildeter Halbleiter
Die Termverschiebungen zwischen Festkörper und Atom wurden der Einfachheit halber weggelassen

Dieser Aufsatz entspricht dem Übersichtsreferat an der SEV-Tagung über Photovoltaische Energieumwandlung vom 15. April 1982.

[1]) Cd Cadmium, Cu Kupfer, S Schwefel, Si Silizium.

Ge bringen 5wertige Verunreinigungen wie P, As, Sb[2]) je ein Überschusselektron in den Kristall, das bei Raumtemperatur frei beweglich ist und zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit führt. Man spricht dann vom n-typ-Halbleiter. Im Gegensatz dazu ist der p-typ(Si oder Ge)-Halbleiter mit 3- oder weniger-wertigen Verunreinigungen wie B, Al, Ga, In dotiert. Figur 3 zeigt das Energieschema eines n- und eines p-dotierten Halbleiters.

1.3 Kontakte zwischen Halbleitern sowie Halbleitern und Metallen

Für die Anwendungen sind die Kontakte zwischen n- und p-dotierten Halbleitern (p/n-Übergänge) und zwischen dotierten Halbleitern und Metallen von besonderer Wichtigkeit. Letztere können ohmisch oder aber auch Sperrkontakte sein (Tabelle I).

Zunächst werde nur der p/n-Homoübergang betrachtet, also ein Kontakt zwischen n- und p-Halbleitern des gleichen Basismaterials. Im Gegensatz dazu steht der Heterokontakt (Heterodiode), wo der n- und der p-dotierte Teil aus chemisch unterschiedlichen Halbleitern besteht. Bei der Schottkybarriere ist der n- oder p-Teil durch ein geeignetes Metall ersetzt (Tab. I). Figur 4 zeigt schematisch ein solches Gebilde.

[2]) Al Aluminium, As Arsen, B Bor, Ga Gallium, Ge Germanium, In Indium, P Phosphor, Sb Antimon.

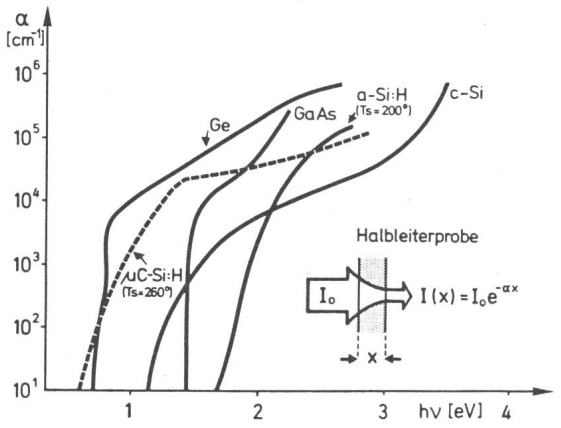

Fig. 2 Absorptionskonstante verschiedener bekannter Halbleiter

a-Si:H	Amorphes Silizium mit Wasserstoff dotiert
c-Si	Kristallines Silizium
μC-Si:H	Mikrokristallines Silizium mit Wasserstoff dotiert
T_s	Substrattemperatur (= Abscheidetemperatur)
h	Plancksche Konstante: $6.62 \cdot 10^{-34}$ Js
ν	Strahlungsfrequenz

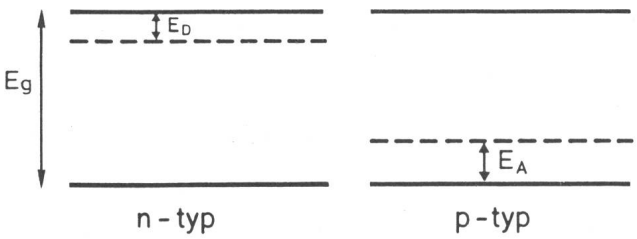

Fig. 3 Energieschema für dotierten Halbleiter

Beispiel: Basishalbleiter Silizium: $E_g = 1.11$ eV

n-Dotierung:	P,	As,	Sb,	Bi
E_D:	44,	49,	39,	68 meV
p-Dotierung:	B,	Al,	Ga,	In
E_A:	45,	57,	65,	160 meV

Arten von Sperrkontakten Tabelle I

Kontaktart	Beispiele[3])
Homokontakte	pSi/nSi, pGe/nGe, pGaAs/nGaAs
Heterokontakte	pSi/nCdS, pInP/nCdS, p^+Cu_2S/nCdS
Schottkybarrieren	Au/nSi, Ti/pSi, Pd_2Si/nSi
MIS-Kontakte	Au/SiO_x/nSi, Au/$GaAsO_x$/GaAs, Au/ZnSe/CdSe

+ bedeutet sehr starke Dotierung, bis zu metallischer Leitfähigkeit. MIS = *M*etal-*I*nsulator-*S*emiconductor. I besteht bei Solarzellen aus einer 1...2 nm dicken Isolatorschicht zwischen Metall und Halbleiter.

An der Grenzfläche entsteht eine Raumladungszone, da Elektronen von der n-Seite auf die p-Seite abfliessen. Die Raumladung erzeugt an der Grenzfläche ein inneres Feld F. In der Feldzone gibt es keine frei beweglichen Ladungsträger. (+) bedeutet ionisierter Donator, (−) ionisierter Akzeptor. Die Energieverteilung der Elektronen über dem gesamten p/n-Übergang ist ebenfalls in Figur 4 dargestellt. Diese Anordnung hat wegen des inneren Feldes F eine Asymmetrie, welche sich auch im Stromfluss äussert (vgl. Fig. 5).

$$j = j_s \, [\exp (e_0 \, U/\gamma \, kT - 1] \qquad (1)$$

U Spannung über Diode
j_s Sperrstrom
e_0 $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As, Elementarladung
k Boltzmannkonstante
T Temperatur in K
γ Diodenqualitätsfaktor (meist zwischen 1 und 2)

Der Strom fliesst nur, wenn n die negative Spannungspolarität von U trägt, d.h. man hat Gleichrichtung. Man kann die p-Seite auch durch ein Metall hoher Austrittsarbeit ersetzen (Edelmetalle) oder die n-Seite durch ein Metall niedriger Austrittsarbeit (Be, Yb, Sc, Y, Ti, Zr, Hf[4]) usw.) und erhält gleiches Stromflussverhalten. In umgekehrten Fällen würde man meist ohmsches Verhalten beobachten.

2. Solarzelle als beleuchteter Gleichrichter

2.1 Charakteristische Eigenschaften

Wird ein Gleichrichter von der p- oder n-Seite her beleuchtet, so können absorbierte Photonen (= Lichtquanten) der Energie $h\nu > E_g$ Elektronen vom vollen ins leere Band hochheben. Tritt dieser Prozess in der Feldzone ein, dann wird das Elektron durch das innere Feld auf die n-Seite hinübergetrieben (Fig. 4); in einem beleuchteten Gleichrichter entsteht also eine elektrische Spannung, die Photovoltaspannung mit identischer Polarität wie in der Durchlassrichtung, jedoch ist der induzierte Photostrom j_p dem Strom in der Vorwärtsrichtung entgegengesetzt. Daher muss die beleuchtete Charakteristik lauten:

$$j = j_s \, [\exp (e_0 \, U/\gamma \, kT) - 1] - j_p \qquad (2)$$

Die zu den Gleichungen (1) und (2) gehörigen Kurven sind in Figur 5 dargestellt.

Damit die Lichtquanten in der aktiven Zone absorbiert werden, muss der dem Licht zugewandte n- oder p-Halbleiterteil (oder Metallteil) entsprechend dünn sein. Ausserdem muss

[3]) Au Gold, O Sauerstoff, Pd Palladium, Se Selen, Ti Titan, Zn Zink.

[4]) Be Berillium, Hf Hafnium, Sc Scandium, Y Yttrium, Yb Ytterbium, Zr Zirkonium.

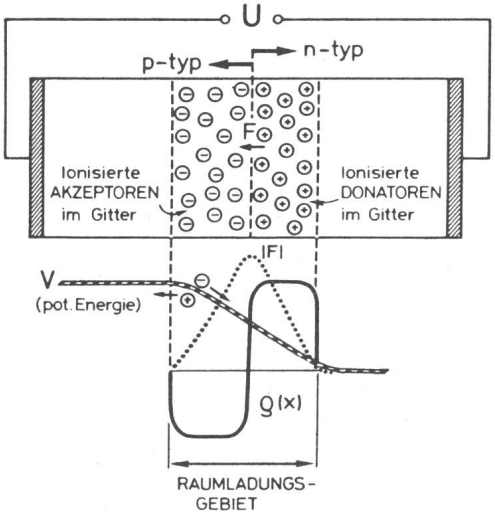

Fig. 4 **Raumladung $\varrho(x)$, inneres Feld F, und potentielle Energie V eines homogen dotierten p/n-Überganges**

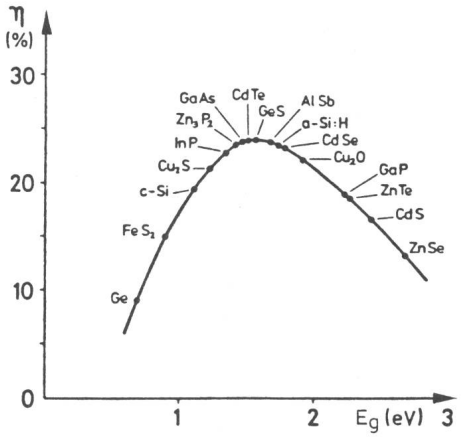

Fig. 7 **Maximaler Wirkungsgrad η in Funktion der Energielücke E_g**

er mit einer geeigneten Antireflexschicht bedeckt werden ($^1/_4$ der Wellenlänge). Figur 6 zeigt eine Darstellung einer Solarzelle. Das Metallgitter dient in erster Linie dazu, den Innenwiderstand auf Kosten der beleuchteten aktiven Fläche herabzusetzen.

In der beleuchteten Charakteristik nach Gleichung 2 sind hervorzuheben: Die Leerlaufspannung U_0 ist gegeben durch

$$U_0 = \frac{\gamma\, kT}{e_0} \ln\left(1 + \frac{j_p}{j_s}\right) \tag{3}$$

U_0 beträgt für die Intensität einer Sonne $^1/_2 ... ^2/_3\ E_g/e_0$ für gebräuchliche Zellen.

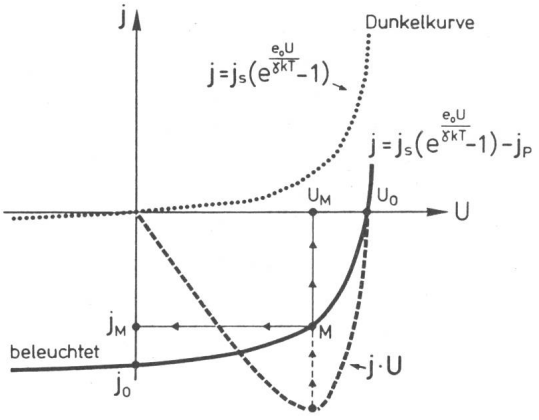

Fig. 5 **Dunkel- und Hellcharakteristik eines flachen p/n-Überganges (bzw. einer Schottky- oder MIS-Diode)**

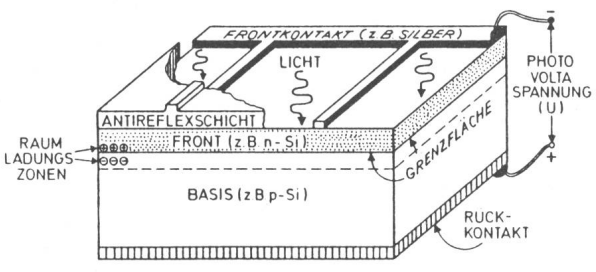

Fig. 6 **Schematische Darstellung einer p/n-Solarzelle**

Der Kurzschlußstrom ist $j_0 = j_p \sim I$, wo I die einfallende Lichtintensität (mW/cm^2) ist.

Wenn man das Leistungsprodukt $j \cdot U$ aufträgt, stellt man fest, dass in der Nähe von U_0 ein Maximum auftritt [2]. Der Arbeitspunkt M kann durch Wahl der Lastimpedanz so festgelegt werden, dass die Zelle maximale elektrische Leistung abgibt. Der Wirkungsgrad η ist dann definiert als

$$\eta = \frac{j_M \cdot U_M}{I} \tag{4}$$

Die Kunst der Solarzellentechnik besteht nun darin, η mit wirtschaftlich geringstem Aufwand möglichst gross zu machen. Dieser Wirkungsgrad η der Solarzelle ist eine Funktion vieler Grössen, u.a. der Energielücke E_g, verschiedener Halbleiterparameter, der Temperatur T, der Dotierungen n, p, der Antireflexqualität, der Flächenbedeckung des Metallgitters, des Diodenqualitätsfaktors γ usw. Nimmt man zunächst bei Raumtemperatur optimale Bedingungen an, so lässt sich der maximal mögliche Wirkungsgrad als Funktion der verbotenen Zone darstellen. Figur 7 zeigt, dass es für eine Einzelzelle einen maximal möglichen Wirkungsgrad von ca. 25 % bei einer Energielücke von ca. 1,4 eV gibt. Diese Kurve setzt die Sonne als schwarzen Strahler mit einer Oberflächentemperatur von knapp 6000 °C voraus, sowie die Erzeugung eines Ladungsträgerpaares (+) (−) pro absorbiertem Photon, dessen Energie $hv \geqq E_g$ ist [3].

2.2 Optimierung des Wirkungsgrades einer Solarzelle

Aus Figur 7 ist ersichtlich, dass für beste Wirkungsgrade die verbotene Zone ca. 1,4 eV betragen sollte. Neben den in der Figur eingetragenen Halbleitern[5]) erfüllen diese Bedingung z.B. auch WSe_2[6]), $ZrSe_3$, Zn_3P_2, $CdSiAs_2$, $CuInS_2$. Mit GaAs sind in der Tat auch Wirkungsgrade bis 25 % erzielt worden [4]. Der Aufwand dazu ist aber so gross, dass eine wirtschaftliche Massenfertigung mit heute verwendeten Technologien niemals in Frage kommt. Auch die übrigen Halbleiter sind schwierig herzustellen und haben viele Nachteile im Vergleich zu der fortgeschrittenen Siliziumtechnologie. Tabelle II ent-

[5]) Fe Eisen, Te Tellur.
[6]) W Wolfram.

Übersicht über wichtigste und beste Solarzellen [5] Tabelle II

Zellenmaterial Basis/Front		η (%) Labor	η (%) kommerz.	Bemerkungen
p/n Si	einkristallin	17–18	15	
p/n Si	polykristallin	14	10–12	
pSi/Al	einkristallin	17.6		[6]
p-i-n Si	amorph	8,06	4–5	
p/n GaAs	einkristallin	21		$n^+/p/p^+$-Struktur
p/n GaAs	polykristallin	7,1		[7]
n/pGaAs/$pGa_{1-x}Al_xAs$	einkristallin	25		konzentr. Sonnenlicht [4]
$nCdS/p^+Cu_2S$	polykristallin	10,2	5–6	CdS enthält 10–20% ZnS [8]
p/nCdTe/nCdS	einkristallin	11		
p/nCdTe/nCdS	polykristallin	8–9		
pGaAs/nAlAs	einkristallin	18,5		
p/nInP	einkristallin	15		[9]
pInP/nCdS	einkristallin	15		
pInP/nCdS	polykristallin	6		
$pCuInSe_2/nCdS$	einkristallin	12		
$p^+/iCuInSe_2/i/n^+CdS$	polykristallin	9,4		[10]

hält eine Zusammenstellung der wichtigsten Solarzellen mit den besten Wirkungsgraden.

Die übrigen Optimierungsbedingungen sind unabhängig von der Energielücke die gleichen, z.B. für p/n-Homosolarzellen:

1. Optimale Dotierung und Dicke von Rückseite, Basis und Front, Ausbildung als p^+-p-n^+ oder n^+-n-p^+ Zellen.
2. Minimalisierung des Sperrstromes j_s der Diode.
3. Optimierung des Stromsammelgitters (ca. 5–6% der aktiven Fläche für eine Sonne).
4. Optimierung des Brechungsindexes n_{AR} der Antireflexschicht durch die Beziehung $n_{AR} = (n_{Halbleiter})^{1/2}$. Dies ergibt für Silizium Werte von n_{AR} im Bereiche 1,9...2,1 je nach Spektralbereich. Diese Bedingung wird erfüllt z.B. durch TiO_2, Ta_2O_5, Nb_2O_5, Al_2O_3 und Si_3N_4[7]).
5. Optimale Dicke der Antireflexschicht ($^1/_4$ der Wellenlänge), für welche $n_{AR} = \sqrt{n_{Si}}$ erfüllt ist.

Bei Heterodioden kommen noch weitere, komplizierende Bedingungen vor, wie gleiche Gitteranpassung usw. Im Falle der Schottky- oder MIS-Zelle muss auch die Metallschicht optimal dick (ca. 10 nm) sein sowie die isolierende Schicht I zwischen Halbleiterbasis und Metallfilm (ca. 1,5...2 nm, Fig. 8).

[7]) N Stickstoff, Nb Niobium, Ta Tantal.

3. Solarzellenmaterialien

3.1 Silizium

Einkristallines Silizium

Trotz der nicht optimalen Energielücke haben Siliziumsolarzellen die weitaus grössten Zukunftsaussichten. Dies liegt an der unbeschränkten Verfügbarkeit und auch an der fortgeschrittenen Technologie. Die marktmässige Verfügbarkeit ist heute nur durch die Produktionskapazitäten beschränkt. Für die Raumfahrt wurden bisher Silizium-Einkristallzellen verwendet, welche unter dem Sonnenspektrum ausserhalb der Erdatmosphäre Wirkungsgrade von 15–16%, unter terrestrischen Bedingungen maximal 18% Wirkungsgrad erreichten. Die Zucht von Einkristallen und die Zerlegung in dünne Platten (ca. 0,3 mm) ist so aufwendig, dass das Ziel, ein Preis von ca. Fr. 1.– pro Solarwatt, kaum zu erreichen ist. Es existieren mehrere neue Verfahren, welche direkt einkristalline oder fast einkristalline Bänder hoher Qualität ziehen [11]. Im Vergleich zu den billigeren polykristallinen Zellen, welche oft über 80% des einkristallinen Wirkungsgrades erreichen, konnten sich diese Methoden aber für die Produktion bisher nicht durchsetzen. Im Moment bemüht man sich eindeutig, möglichst billiges Ausgangsmaterial (MG-Si = Metallurgical Grade Silicon = «Siliziummetall») zu verwenden und daraus polykristalline Zellen herzustellen.

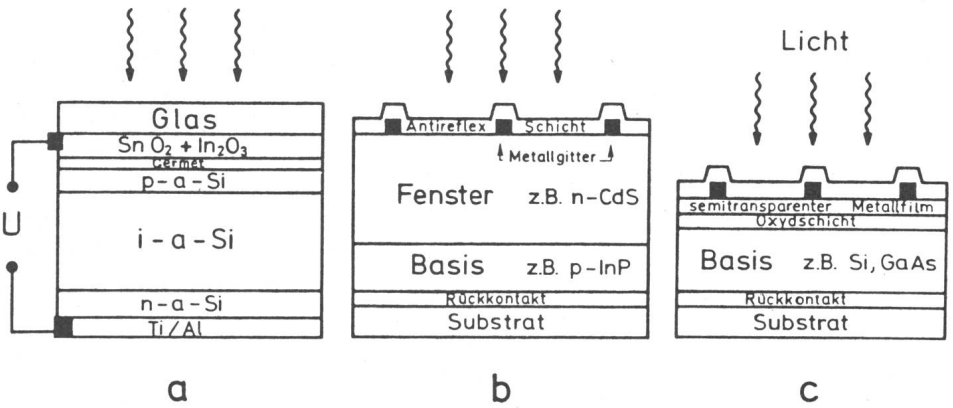

Fig. 8
Querschnitt durch a) p-i-n-Zelle b) Heterozelle c) MIS-Zelle

Polykristalline Zellen

Den ersten bemerkenswerten Erfolg auf diesem Gebiet erreichte die Fa. Wacker (heute Wacker Heliotronic) in Burghausen (BRD), welche das Silso-Material entwickelte. Silso sind Siliziumbarren von quadratischem Querschnitt, welche gerichtet erstarrt und in Scheiben von 0,3–0,35 mm zersägt werden (Fig. 9). Zellen aus solchem Material werden heute durch AEG-Telefunken serienmässig gefertigt und als gebrauchsfertige Module verkauft. Der Erfolg von Silso besteht darin, dass störende Korngrenzeneffekte nahezu eliminiert wurden, da die Korngrenzen senkrecht zur Platte liegen und somit den Photostromfluss nur geringfügig beeinträchtigen.

In den USA wurde von Solarex ein ähnlicher Weg beschritten; es wurden semikristalline Zellen massengefertigt. Neuere Verfahren bestehen darin, polykristalline Schichten direkt auf billigem Substrat abzuscheiden (z.B. SOC, Fig. 10) [12], mit Wirkungsgraden von 9–10,5 %, und die Schichten mit Laserstrahlen zu rekristallisieren. Es gibt eine Vielfalt von Prozessen [11]. Bemerkenswert waren erste Erfolge (1981) in USA und Japan, sehr billiges Ausgangsmaterial (MG-Si) zu guten Zellen bis $\geqq 12\,\%$ Wirkungsgrad zu verarbeiten [13]. Der Materialpreis von MG-Si beträgt bei 0,3 mm Plattendicke und 11 % Wirkungsgrad nur 2–3 Rappen/W; das «Elektronik»-Si ist etwa 100mal teurer.

Mikrokristallines Silizium

Eine neue Form von Silizium wurde erst kürzlich von *S. Veprek* und Mitarbeitern (Uni Zürich) untersucht [14], das sog. mikrokristalline Si (μC-Si). Es besteht aus sehr winzigen Kristalliten von 3–12 nm Durchmesser und entsteht durch Abscheidung in einem Plasma, das durch Hochspannung über einem Si-Target in strömendem Wasserstoff erzeugt wird, bei Abscheideraten von 0,05–0,5 nm/s (Fig. 11).

Es zeigt eine noch nicht verstandene stark überhöhte optische Absorption im Vergleich zum gewöhnlichen kristallinen Silizium, welche für Dünnfilmzellen grundsätzliche Bedingung ist. Das Device-Verhalten ist bisher noch nicht geprüft worden. Man weiss jedoch, dass sich μC-Si dotieren lässt und im Vergleich zu amorphem Silizium bezüglich Transporteigenschaften entscheidende Vorzüge aufweist. Dieses Material kann in den nächsten Jahren möglicherweise eine wichtige Stellung in der Forschung und Entwicklung billiger Solarzellen erreichen.

Amorphes Silizium

Die Herstellung von amorphem Silizium (a-Si) durch Aufdampfen im Vakuum ist schon lange bekannt, jedoch ergaben sich wegen des hohen Widerstandes und der Nichtdotierbarkeit bis vor kurzem keine Anwendungen. *Spear* und Mitarbeiter in England stellten erstmals a-Si-Schichten durch Glimmentladung von Silan (SiH_4) her, welche neue vielversprechende Eigenschaften zeigten [14]. Das anfänglich nicht bekannte Erfolgsgeheimnis dieser Schichten lag im Einbau von Wasserstoff, welcher die vielen ungesättigten Bindungen (dangling bonds) absättigte und dadurch die Eigenschaften von a-Si veredelte (Fig. 12).

Carlson, Wronski u.a. (RCA, USA) stellten auf dieser Materialbasis erstmals Solarzellen her, welche 2,4 % (p-i-n) und 5,5 % (MIS) Wirkungsgrad erreichten [16; 17]. Ab 1976 wurde wegen ihrer wesentlich günstigeren Stabilität nur noch die p-i-n-Zelle weiterentwickelt (Fig. 8a). Figur 13 zeigt die zeitliche Entwicklung des Wirkungsgrades solcher amorpher Silizium-p-i-n-Zellen.

In den vergangenen drei Jahren hat sich auch Japan mit der Forschung und Entwicklung befasst und hat bis heute Zellen mit über 8 % Wirkungsgrad erreicht. Gleichzeitig wurde von Sanyo auch die Fabrikation weniger leistungsfähiger Zellen begonnen, insbesondere für Taschenrechner, Uhren, Spielzeuge u.a., wo die höhere Spannung von a-Si-Zellen im Vergleich zu kristallinen Zellen wichtiger ist als eine grosse Leistung.

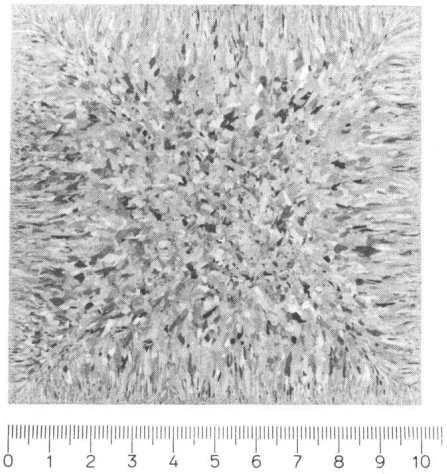

Fig. 9 Frontansicht von Wacker-Silso-Platten

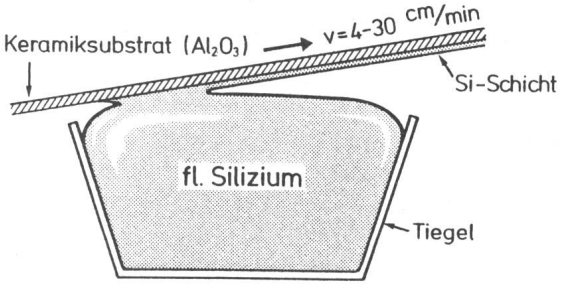

Fig. 10 Darstellung des SOC-Prozesses
(SOC = *S*ilicon *O*n *C*eramics)

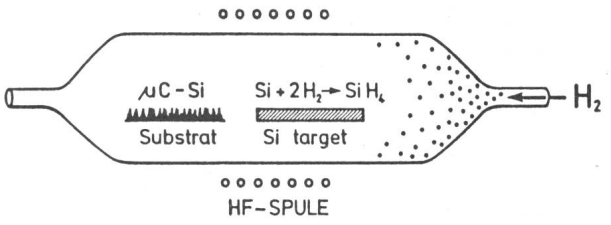

Fig. 11 Schema zur Herstellung von mikrokristallinem Silizium [14]

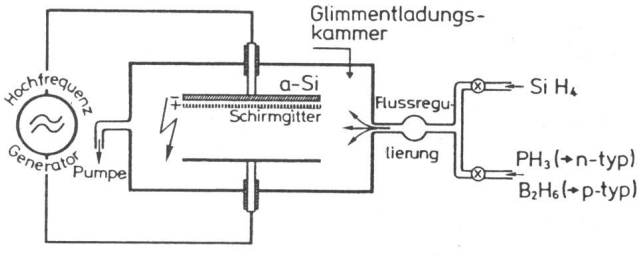

Fig. 12 Herstellung von a-Siliziumschichten

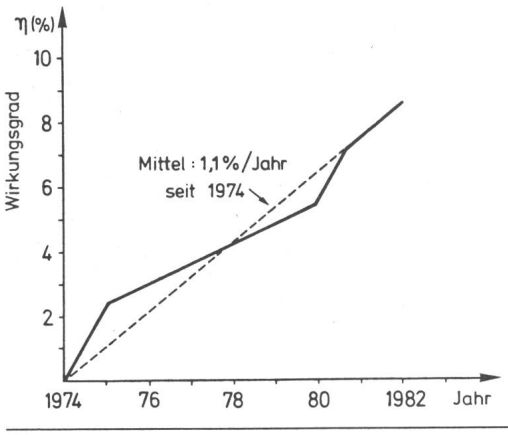

Fig. 13 Zeitliche Entwicklung des Wirkungsgrades amorpher Silizium-p-i-n-Zellen
Daten: RCA Labs., USA, sowie japanische Forschungsgruppe

Die a-Si-Zelle ist zurzeit eine intensiv diskutierte Alternative zur polykristallinen Si-Zelle. Die Vorzüge liegen auf der Hand: die höhere optische Absorption von a-Si, die höhere Energielücke, der viel geringere Materialaufwand, die einfachere und leichter automatisierbare Verfahrenstechnik für Dünnfilmschichten (etwa im Vergleich zum Plattensägen). Als Nachteile sind zu nennen: Bisher geringerer Wirkungsgrad, vor allem zufolge hohem Innenwiderstand und reduziertem Photostrom. Die obere erreichbare mögliche Grenze des Wirkungsgrades ist nach wie vor umstritten und schwankt zwischen 8 und 15 %. Auch was die Langzeitstabilität der Zellen betrifft, hat man noch nicht die Sicherheit wie mit kristallinem Silizium. Die Beleuchtung führt oft zur Degradation (*Staebler-Wronski-Effekt*), welche nach dem Tempern wieder rückgängig gemacht werden kann. Da die Ausdiffusion des Wasserstoffes die Zelle verschlechtert, muss die langfristige Stabilität besonders bei höheren Temperaturen überprüft werden.

3.2 Cadmiumsulfid/Kupfersulfid

Diese Solarzelle wurde wie die Siliziumzelle schon 1954 erstmals untersucht und seither mit unterschiedlichem Aufwand entwickelt. Ursprünglich für Raumfahrtzwecke entwickelt, stellten sich alsbald grundsätzliche Schwierigkeiten ein, wie unzureichender Wirkungsgrad (Tabelle II) und thermische Instabilität der Grenzfläche zwischen CdS und Cu_2S. Die Stabilität lässt sich durch Versiegeln mit Kunststoffen verbessern. Langfristig jedoch sind Temperaturen über ca. 80 °C schädlich, was in Wüstengegenden oder unter konzentriertem Licht schnell erreicht ist. Verbesserungen lassen sich neuerlich erreichen durch partielle Substitution von CdS durch ZnS [8], so dass Laborversuche kürzlich erstmals Wirkungsgrade über 10 % ergaben, knapp doppelt soviel wie kommerziell fabrizierte Zellen. Bei weiteren Fortschritten im Bereiche der amorphen Silizium-Dünnschichtzellen ist die rasche Verdrängung der $nCdS/p^+Cu_2S$ zu erwarten.

3.3 Verschiedene Halbleiter

III-V-Verbindungen: GaAs, InP, AlSb u.ä.

Unter den Verbindungshalbleitern nimmt vor allem die III-V-Verbindung GaAs sowie eine Abart davon $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$ eine führende Stellung ein. Letztere zeigt unter allen Einzelzellen auch den höchsten Wirkungsgrad von 23–25 % [4] (auch in konzentriertem Licht) und von 21 % für $p^+/p/n^+$-GaAs-Homodioden. Die Herstellungskosten sind aber so hoch, dass der Wattpreis mit anderen Energiequellen kaum je konkurrieren kann. Polykristalline Dünnschichtzellen erreichen jedoch heute in Labor-Einzelausführungen nur etwa 7 % Wirkungsgrad [7]. Einkristalline $n^+/p/p^+$-InP-Dioden haben bisher 15 % erreicht [9] und Dünnfilmzellen knapp 6 %. Der höhere In-Preis, die geringere Verfügbarkeit und der niedrigere Wirkungsgrad lässt InP gegenüber GaAs in der Priorität zurücktreten.

Von Interesse wäre auch AlSb. Es existieren jedoch widersprüchliche Angaben über die chemische Stabilität dieser Verbindung an Luft, so dass noch keine Versuche darüber vorliegen.

II-VI-Verbindungen: CdSe, CdTe

Beide Halbleiter wären von den elektronischen Parametern her gesehen interessant. Die präparativen Schwierigkeiten sind allerdings zurzeit eher entmutigend und lassen nicht auf schnelle Erfolge hoffen. CdTe/CdS wäre allerdings wesentlich stabiler als CdS/Cu_2S.

Übrige binäre und ternäre Verbindungen

Es existieren durchaus Gründe, weshalb auch weitere Verbindungshalbleiter für längerfristige Projekte von Interesse wären. Derzeit werden untersucht: Zn_3P_2, InSe, WSe_2, $CuInSe_2$, $CdSiAs_2$ sowie organische Halbleiter. Es ist jedoch nur langfristig (10–20 Jahre) mit Erfolgen bei neuen Materialien zu rechnen.

4. Wirtschaftliche Betrachtungen

4.1 Ist-Zustand

Zur Gewinnung von Energie auf photovoltaischem Wege sind grundsätzlich verschiedene Modelle denkbar. Wenn man die Entwicklung dieser Energieform anstrebt, muss man versuchen, sich über folgende Fragen Klarheit zu verschaffen:

1. Wo liegen die möglichen Anwendungen und was sind deren Anforderungen? Ist ein freier, gewinnbringender Markt zu erwarten? Sind die photovoltaischen Energiepreise konkurrenzfähig für die geplanten Anwendungen?
2. Welche Photovoltamaterialien kommen in Frage?
3. Welche Herstellungsprozesse kommen bei einem bestimmten Material für den wirtschaftlichen Einsatz in Frage?
4. Konzentratorsysteme oder unkonzentrierte Systeme, Tandemsysteme oder monolytische Kaskadensysteme?
5. Wo liegen die Hindernisse beim Einsatz der photovoltaischen Energie und welche zusätzlichen Anstrengungen im Forschungs- und Entwicklungsbereich sind zu leisten, um diese Hindernisse zu beseitigen?

1. Anwendungen von photovoltaischen Stromanlagen gibt es schon eine ganze Anzahl, vor allem in abgelegenen und tropisch-subtropischen Gegenden mit hoher Sonneneinstrahlung, z.B. Nottelefone und Verkehrssignale an entlegenen Verkehrswegen, meteorologische Meßstationen und deren automatische Datenübermittlung in zentrale Stationen, seismische Detektoren, Leuchttürme und Meerbojen, Wasserpumpen und Bewässerungsanlagen in entlegenen ländlichen Gegenden, Entsalzungsanlagen, Kühlanlagen, zentrale Energieversorgungsanlagen in kleineren Dörfern und Einzelhäusern oder Inseln, Notstromanlagen, landwirtschaftliche Betriebe, etwa im Zusammenhang mit Biogasanlagen.

In vielen Fällen kann heute schon festgestellt werden, dass photovoltaische Anlagen bei einer projektierten Lebensdauer

von 10 Jahren im Vergleich zu Dieselaggregaten kostengünstiger ausfallen. Dazu tragen vorerst die relativ geringere und einfachere Wartung sowie der entfallende Energietransport (Dieselöl) bei. Gleiches ist bei entfernten Meßstationen oder Notanlagen zu bemerken. In Gegenden jedoch mit zentraler Stromversorgung ist selbst bei praktisch permanenter Sonnenscheindauer bei einer Lebensdauer von 10 Jahren das elektrische Solarwatt bei dem heutigen Kilowattpreis ab Netz noch 10mal zu hoch.

Die photovoltaischen Energiepreise sind deshalb zurzeit erst konkurrenzfähig, wo teure Investitionen für Stromzuleitungen oder der Ankauf eines Stromaggregates weitab von Transportwegen erforderlich ist.

Die meisten grösseren photovoltaischen Pilotanlagen sind bisher in Entwicklungsländern aufgestellt worden. Sie dienen der Erprobung durch die westlichen Industrieländer und Japan. Was den Photovoltamarkt betrifft, so gibt es relativ wenige klimatisch günstig liegende und zahlungskräftige Länder (z.B. USA sowie einige OPEC-Staaten). Die Entwicklung der Photovoltaenergie stützt sich daher zurzeit noch wesentlich auf staatlich subventionierte Forschung und Entwicklung durch die Industriestaaten, wovon weniger bemittelte Entwicklungsländer mitprofitieren können. Eine initiale staatliche Hilfe ist zwar nötig, darf jedoch nie so weit gehen, dass der freie Photovoltamarkt in der Entwicklung behindert wird. Die Photovoltaenergie als alternative Energie kann sich langfristig nur durchsetzen, wenn sie auf die Dauer selbsttragend und vielleicht, wenn auch mässig, gewinnbringend arbeitet.

2. Die Fachleute sind sich weitgehend einig, dass sich kurzfristig (d.h. in den nächsten 10–20 Jahren) nur Silizium als Photovoltamaterial durchsetzen wird. Dies ist auch daran ersichtlich, dass Silizium (amorph und kristallin) bezüglich des finanziellen Fördervolumens den Löwenanteil ausmacht. Dies liegt an der praktisch unbeschränkten Verfügbarkeit und der weit vorangeschrittenen Si-Technologie. In bezug auf die Form dieser Zellen, welche sich marktmässig durchsetzen kann, ist man jedoch schon recht unterschiedlicher Meinung. Polykristalline p/n-Si-Zellen haben zwar grössere Wirkungsgrade, und deren zeitliche Stabilität ist erwiesen; andererseits ist von der Wirtschaftlichkeit und Verfahrenstechnik her die a-Dünnschichtzelle der kristallinen Si-Zelle stark überlegen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass je nach Verwendungszweck beide Zelltypen zur Marktreife kommen und sich durchsetzen werden. Für Anwendungen bei höheren Spannungen und wenig Leistung ist wohl heute schon die a-Si-Zelle geeigneter als die kristalline (z.B. Taschenrechner).

Die neuerliche Entwicklung des μC-Silizium lässt auch hier noch Raum für Überraschungen und Neuentwicklungen. So hat sich kürzlich gezeigt, dass eine Kombination von a-Si mit µC-Si-Schichten sich noch günstiger auf den Wirkungsgrad auswirken kann. Die Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Si-Arten wird Forschungsaufgabe der nächsten Zukunft sein.

CdS/Cu_2S: Ob sich diese Zelle neben Si auf dem Markt wird durchsetzen können, kann man bezweifeln. Sie wird heute von einer Firma gefertigt, und es gibt weitere Pläne, die billige Massenproduktion zu beginnen. Preislich ist sie heute nicht günstiger als Silizium, und bezüglich thermischer Stabilität ist sie Silizium unterlegen. Verfahrenstechnisch ist die Herstellung zwar sehr attraktiv; jedoch muss man beachten, dass der heutige Wirkungsgrad von ca. 6–7 % bei Massenfertigung auch grössere Bedeckungsflächen bedeutet, was oft sehr einschränkend wirken kann. Es ist sehr wahrscheinlich, dass bei weiteren Fortschritten im Bereiche des a-Si diese Zelle vom Markt verdrängt wird.

GaAs: Diese polykristalline Dünnschichtzelle hat heute labormässig Wirkungsgrade von 7–8 % erreicht, einkristalline Zellen bis 21%. Letztere hat wohl am ehesten eine Chance in Konzentratorsystemen, wo der Zellenpreis weniger ins Gewicht fällt. Ohne massive Verbesserungen wird die polykristalline GaAs-Dünnschichtzelle sich gegenüber der a-Si-Zelle kaum durchsetzen können.

CdTe/CdS: Diese Zelle hätte wahrscheinlich in der Entwicklung ebenfalls gewisse Chancen, wird aber nicht intensiv weiter verfolgt.

Die übrigen Verbindungshalbleiter liegen in der Entwicklungsarbeit so weit zurück, dass man keine Prognosen wagen kann. Es gibt auch im Bereiche dieser Halbleiter interessante Entwicklungsideen, deren erfolgreiche Durchführung durchaus zum Gedanken berechtigen, dass für gewisse Anwendungen neben Silizium auch neue Verbindungshalbleiter in Frage kommen.

3. Unter dem Druck, den Solarwattpreis zu senken, kommen nur allerbilligste Verfahrensprozesse bei Massenfertigung zum Einsatz, die sich auch leicht automatisieren lassen. Man muss sich im klaren sein, dass die Einzelzelle in Zukunft kaum etwas kosten darf. Eine wichtige Nebenbedingung ist dabei auch, dass der Energierückfluss ausreichend gewährleistet sein muss. Hierzu gibt es Analysen, dass Gasphasenepitaxie von diesem Standpunkt aus nicht sehr geeignet ist, da der Ausnützungsgrad niedrig ist (1–3 %) und der energetische Aufwand der Herstellung ziemlich hoch [18].

Es sind eher metallurgische Verfahren wie Giessen, Ziehen, Walzen, Schneiden, Pressen, Tauchen, Sprühen, Zerstäuben usw., welche angestrebt werden müssen. Auch dieses Feld ist für viele Innovationen noch offen, wie das Beispiel Si beweist.

4. In vielen nationalen Programmen wird der wirtschaftliche Einsatz von Konzentratorsystemen bezweifelt. Die Vorzüge liegen im etwas höheren elektrischen Wirkungsgrad. Sofern man die bei Konzentratoren anfallende thermische Energie mitverwenden kann, ist ein Wirkungsgrad bis über 60 % möglich (ca. 25 % elektrischer + 40 % thermischer Wirkungsgrad).

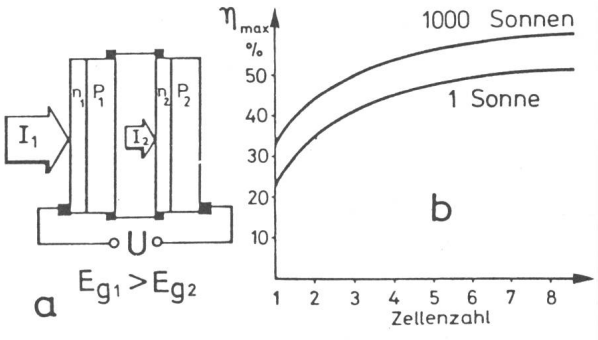

Fig. 14 Tandemsysteme
a Wirkungsweise von zwei Tandemzellen
b Maximale Wirkungsgrade in Funktion der Zahl optimierter Tandemzellen für einfaches Sonnenlicht und 1000fache Konzentration

In Anwendungen, wo hohe Wirkungsgrade besonders notwendig sind, werden in fernerer Zukunft evtl. Tandemsysteme zum Einsatz kommen. Figur 14 zeigt die erreichbaren Wirkungsgrade in Funktion der Zellenzahl, wobei alle Energielücken optimiert sind [19]. Die Schwierigkeit bei Tandemzellen und monolytischen Kaskadenzellen [20] liegt in der Übereinstimmung der Photoströme.

Monolytische Kaskadensysteme wären von der integrierten Bauweise her besonders attraktiv. In erster Linie kämen hier Kombinationen von III–V Systemen in Frage. Solche Entwicklungen sind erst in fernerer Zukunft zu erwarten.

5. Trotz der umweltfreundlichen Photovoltatechnologie existiert eine ganze Anzahl Hindernisse sachlicher und z.T. eher ideologischer Natur.

Zu den sachlichen Hindernissen: Für viele Anwendungen ist der Preis zu hoch. Eine allzu forsche Expansion der Solarzellenindustrie hätte eine massive Verknappung im Siliziumangebot zur Folge. In Regionen mit fluktuierender Sonneneinstrahlung scheitert die Anwendung oft auch wegen des ungelösten Speicherproblemes, vor allem bei grossen Leistungen, insbesondere dann, wenn eine kontinuierliche konstante Energieversorgung erforderlich ist.

Das Risiko einer teuren Investition wird verständlicherweise oft gescheut. Die photovoltaische Energieversorgung hat grundsätzlich anderen Charakter als die Versorgung vom Netz, wo einfach ein fester Preis pro Energieeinheit bezahlt werden muss. Sie ist vorwiegend dezentral und hat den Charakter einer Investition, welche Risiken in sich birgt: Lebensdauer, Stabilität, evtl. noch unbekannte Schwierigkeiten, die sich im Einzelfall erst ergeben können. Der Preis hängt langfristig von diesen Faktoren ab, im Gegensatz zu mehr oder weniger überblickbaren Festpreisen von Kraftwerkgesellschaften. Die fallende Preisentwicklung lässt viele auch zögern, eine solche Investition zu tätigen.

Zu den weniger sachlich begründbaren Hindernissen: Ästhetische Widerstände, dass das Aufstellen von Solarzellenmodulen die Landschaft verschandle und architektonisch, etwa als Wand- oder Hausdach getarnt, unschön sei. Bedenken von überkritischen Umweltschützern, dass die neue Technologie klimaverändernd wirken könnte oder im Katastrophenfall giftige Produkte (etwa Cd und As im Falle von CdS und GaAs) emittieren könnte. Widerstände seitens der Energieproduzenten, für welche die ihren Interessen diametral gegenüberliegende dezentrale photovoltaische Energieversorgung ungelegen kommt. Entwicklungsländer, welchen photovoltaische Stromversorgungsanlagen oft geschenkweise überlassen werden, fühlen sich zurückgesetzt, da sie sich als Erprobungsfeld dieser neuen Energiequelle «missbraucht» fühlen, damit die reicheren Industrieländer weiterhin länger bei ihrem Öl bleiben könnten.

4.2 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ölembargo 1973/74 hat der Forschung und Entwicklung der Photovoltatechnik entscheidende Impulse verliehen, und man kann heute schon auf eine Phase beachtlicher Erfolge zurückblicken. Seither ist der Preis des elektrischen Solarwatt um einen Faktor 10 gefallen. Der überwiegende Teil der Finanzierung wurde für die Siliziumzelle aufgewendet, welche mindestens in den nächsten 10–20 Jahren das Marktfeld beherrschen wird. Eine Diversifizierung in amorphe und kristalline Solarzellen ist je nach Anwendung zu erwarten. Bei weiterhin fallenden Preisen wird sich allmählich der Anwendungsbereich dieser Energiequelle erweitern und parallel dazu eine sich selbst tragende Photovoltaindustrie aufbauen. Die gleichzeitige technologische und wirtschaftliche Lösung des Speicherproblems würde den Aufbau der Photovoltaindustrie noch beschleunigen. Für die Konkurrenzfähigkeit mit anderen Energieformen muss der Preis mindestens um einen weiteren Faktor 10 gesenkt werden können. Das Ziel der USA, einen Preis von 0,5 $/W zu erzielen, ist wahrscheinlich zu optimistisch. Langfristig stellen sich auch anspruchsvollere Aufgaben, wie z.B. Entwicklung von Hochleistungszellen und Systeme, welche direkt zur Speicherung der photovoltaischen Energie führen. Aus diesem Grunde sollte die Entwicklung von geeigneten Verbindungshalbleitern nicht ganz ausser acht gelassen werden.

Die Entwicklung dieser ökologisch einwandfreien neuen Energiequelle als Teilersatzquelle für das Nachölzeitalter ist heute als vordringliche und auch humanitäre Aufgabe anzusehen.

Literatur

[1] *R. Müller:* Grundlagen der Halbleiter-Elektronik. 3. Auflage. Halbleiter-Elektronik. Band 1. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1979.

[2] *G. Guekos* u.a.: Energietransfer aus Solarzellen. Bull. SEV/VSE 71(1980)13, S. 665...672.

[3] *J.J. Loferski:* Theoretical considerations governing the choice of the optimum semiconductor for photovoltaic solar energy conversion. Journal of Applied Physics 27(1956)7, p. 777...784.

[4] *R. Sahai, D.D. Edwall* and *J.S. Harris:* High-efficiency AlGaAs/GaAs concentrator solar cells. Applied Physics Letters 34(1979)2, p. 147...149.

[5] *E. Bucher:* Solar cell materials and their basic parameters. Applied Physics 17(1978)1, p. 1...26.

[6] *R.B. Godfrey* and *M.A. Green:* 655 mV open-circuit voltage, 17,7% efficient silicon MIS solar cells. Applied Physics Letters 34(1979)11, p. 790...793.

[7] *S.S. Chu* a.o.: Thin-film gallium arsenide homojunction solar cells. Applied Physics Letters 39(1981)10, p. 803...805.

[8] *R.B. Hall* a.o.: Thin-film polycrystalline $Cu_2S/Cd_{1-x}Zn_xS$ solar cells of 10% efficiency. Applied Physics Letters 38(1981)11, p. 925...926.

[9] *G.W. Turner, J.C.C. Fan* and *J.J. Hsieh:* High-efficiency InP homojunction solar cells. Applied Physics Letters 37(1980)4, p. 400...402.

[10] *R.A. Mickelsen* and *W.S. Chen:* Development of 9,4% efficient thin-film $CuInSe_2CdS$ solar cell. Conference Record of the 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 15(1982), p. 800...804.

[11] *H.I. Yoo* a.o.: Improved performance from solar cells made from candidate sheet silicon materials. Conference Record of the 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 15(1982), p. 598...602.

[12] *S.B. Schuldt* a.o.: Large-area silicon-on-ceramic substrates for low-cost solar cells. Conference Record of the 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 15(1982), p. 934...940.

[13] *J.I. Hanoka, H.B. Strock* and *P.S. Kotval:* 11% efficient single-crystal solar cells and 10% efficient polycrystalline cells made from refined metallurgical silicon. Journal of Applied Physics 52(1981)9, p. 5829...5832.

[14] *S. Veprek:* Applications of low pressure plasmas in materials science: especially chemical vapour deposition. Current Topics in Materials Science 4(1980), p. 151...235.

[15] *W.E. Spear* and *P.G. Le Comber:* Investigation of the localised state distribution in amorphous Si films. Journal of Noncrystalline Solids 8–10(1972)–, p. 727...738.

[16] *D.E. Carlson* and *C.R. Wronski:* Amorphous silicon solar cell. Applied Physics Letters 28(1976)11, p. 671...673.

[17] *C.R. Wronski, D.E. Carlson* and *R.E. Daniel:* Schottky-barriers characteristics of metal-amorphous-silicon diodes. Applied Physics Letters 29(1976)9, p. 602...605.

[18] *L.P. Hunt:* Total energy use in the production of silicon solar cells from raw materials to finished product. Conference Record of the 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 12(1976), p. 347...352.

[19] *A. Bennett* and *L.C. Olsen:* Analysis of multiple-cell concentrator/photovoltaic systems. Conference Record of the 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 13(1978), p. 868...873.

[20] *P.G. Borden:* A monolithic series-connected $Al_{0.93}Ga_{0.07}As/GaAs$ solar cell array. Applied Physics Letters 35(1979)7, p. 553...554.

Adresse des Autors

Prof. Dr. *E. Bucher,* Fakultät Physik, Universität Konstanz, Postfach 5560, D-7750 Konstanz 1