

# Photovoltaische Stromerzeugung aus Sonnenlicht - ein Statusreport

Autor(en): **Weidmann, Urs**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **100 (1982)**

Heft 20

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74809>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Photovoltaische Stromerzeugung aus Sonnenlicht – ein Statusreport

Von Urs Weidmann, Aadorf

Am 15. April ist an der ETH Zürich erstmals eine Tagung über photovoltaische Energieumwandlung abgehalten worden. Die unerwartet grosse Teilnehmerzahl lässt auf erwachsenes Interesse an regenerativer Energieerzeugung schliessen. Referenten aus dem In- und Ausland informierten über Technik, Anwendungsbereiche und wirtschaftliche Aspekte von Solarzellen.

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten, Sonnenenergie in elektrischen Strom umzuwandeln: Bei der ersten Art wird das Sonnenlicht über den Umweg von Wärmeenergie in einer Dampf- oder Gasturbine zum Antrieb eines Generators herangezogen. Im Gegensatz zu diesen *solarthermischen Kraftwerken* besteht aber auch die Möglichkeit, mittels des *photovoltaischen Effektes in Halbleitern* Licht direkt in Strom umzusetzen [8].

Der Vorteil der photovoltaischen Wandlung liegt bei den *bescheidenen Wartungsansprüchen* der Systeme, herrührend vom einfachen Aufbau ohne bewegliche Teile, der *Umweltfreundlichkeit* sowie der Möglichkeit, diese Wandler in *Kleinanlagen* (Uhren, Radios usw.) einsetzen zu können. Im Gegensatz dazu zeichnen sich solarthermische Grosskraftwerke, wie sie zurzeit an verschiedenen Orten auf der Welt in Betrieb gesetzt werden, durch folgende Eigenschaft aus: Die meisten Komponenten sind aus der konventionellen Kraftwerktechnik bekannt, was nicht nur zu günstigeren Strompreisen führt, sondern auch die Fragen nach der Lebensdauer und dem nötigen Wartungsaufwand zuverlässig beantworten lässt. Soll auf lange Sicht hingegen Sonnen-

energie nicht zur Herstellung von Prozesswärme (synthetische Brennstoffe, Kohlevergasung usw.) verwendet werden, sondern will man sich nur auf die Stromerzeugung konzentrieren, so muss den weltweiten Forschungsentwicklungen auf dem Gebiet der Photovoltaik grösste Beachtung geschenkt werden.

Am 15. April 1982 wurde deshalb an der ETH erstmals eine Tagung durchgeführt, die unter dem Titel «Photovoltaische Energieumwandlung» über den neuesten Stand dieser Technik informieren wollte. Die grosse Teilnehmerzahl dieser SEV-(Schweizerischer Elektrotechnischer Verein) Veranstaltung liess darauf schliessen, dass auch in der Schweiz die regenerative Energieerzeugung mit immer grösserem Interesse beachtet wird [9].

## Stand und Zukunftsaussichten

Der photovoltaische Effekt, unter dem man die *direkte* Umwandlung von elektromagnetischer Strahlungsenergie in elektrische Energie versteht, ist nur mit Hilfe von *Halbleitern* möglich. Die Entwicklung der Solarzelle – also einer Halbleiterkonfiguration, die Sonnen-

licht in Strom umwandelt – hat durch das Ölembargo 1973/74 entscheidende Impulse erfahren. Nachdem man 1954 in den USA (Bell Laboratories) erste Solarzellen untersucht hatte, sind heute eine ganze Reihe verschiedener, geeigneter Halbleiter bekannt (Bild 1). Prof. Bucher von der *Universität Konstanz* vertrat in seinem Vortrag die Ansicht, dass sich allerdings in den nächsten 10–20 Jahren nur *Silizium als Basismaterial* durchsetzen werde. Er führte dies auf die praktisch unbeschränkte Verfügbarkeit des Rohstoffes (Meersand) und der weit fortgeschrittenen Silizium-Technik zurück. Welche Ausführungsvariante der Siliziumzelle aber letztlich den Markt beherrschen wird, wagt auch er noch nicht vorherzusagen.

### Einkristallines Silizium

Die Zucht von *Einkristallen* und die anschliessende Zerlegung in dünne Scheiben (etwa 0,3 mm) ist so energie- und arbeitsaufwendig, dass das Ziel einer wirtschaftlichen *Grossserienfertigung* auf diesem Wege jedoch nicht erreichbar ist. Es existieren heute nämlich mehrere neue Verfahren, mit denen sich direkt *einkristalline* oder fast *einkristalline* Bänder hoher Qualität ziehen lassen [12]. Im Vergleich zu den nachstehend beschriebenen billigeren *polykristallinen* Zellen, die oft über 80 Prozent des Wirkungsgrades der *einkristallinen* Ausföhrung erreichen können, konnte sich die Herstellungs- methode für *monokristalline* Zellen für die *Grossproduktion* nicht durchsetzen. Die Forschungsziele liegen im Moment eindeutig darauf, möglichst billiges Ausgangsmaterial verwenden zu können, um daraus *polykristalline* Zellen zu fertigen.

### Polykristalline Zellen

Um den energieintensiven Züchtungsprozess der *Einkristallherstellung* zu umgehen, versuchte man, den *Wirkungsgrad* der *mehrkristallinen Halbleiterphotozelle* weiter zu entwickeln: Der kürzlich erzielte Erfolg bestand darin, dass störende *Korngrenzeneffekte* nahezu ausgeschaltet werden konnten, indem die *Korngrenzen* senkrecht zur *Platte* ausgerichtet wurden und dadurch die *Beeinträchtigung* des *Photostroms* herabgesetzt werden konnte.

### Amorphes Silizium

Als dritte Möglichkeit ist die Herstellung von *amorphem Silizium* durch *Aufdampfen* im *Vakuum* aufzuführen. Bild 2 zeigt die zeitliche Entwicklung des *Wirkungsgrades* solcher *amorpher Zellen*. In den vergangenen drei Jahren hat sich auch *Japan* mit dieser Forschung und Entwicklung befasst und hat bis heute *amorphe Zellen* mit über

Bild 1. Zusammenstellung von Wirkungsgraden verschiedener Solarzellen bei terrestrischen Strahlungsbedingungen (Umgebungstemperatur = 28 °C, Einstrahlungsintensität = 1000 W/m<sup>2</sup>) [6]

Nr.	Zellentyp	Erreichter Wirkungsgrad		Voraussichtlich erreichbar bei Massenproduktion η TER %	langfristig erreichbar η TER %	theoretisch erreichbar η TER %
		Labor η TER %	Produktion η TER %			
1	Normale monokristalline Si-Zelle	17,5	13,5	13,5	24	≈ 25
2	Hochleistungs-Si-Zelle (monokristallin)	19	16	16		
3	CNR-Si-Zelle (monokristallin)	20				
4	terrestrische-Si-Zelle (monokristallin) Billigzelle		11	11		
5	Kadmiumsulfidzelle (polykristallin)	8	7,2	4 bis 6	12	
6	Si-Zelle (polykristallin)	6 (2)			10	
7	Galliumarsenidzelle (monokristallin)	19	15,5			

8 Prozent Wirkungsgrad herstellen können. Gleichzeitig wurde von Sanyo auch die Fabrikation weniger leistungsfähiger Zellen dieses Typs aufgenommen, insbesondere für *Taschenrechner, Uhren, Spielzeuge* usw., wo die höhere Spannung von amorphen Siliziumzellen, im Vergleich zu kristallinen Ausführungen, wichtiger ist als eine grosse Leistung.

**Vergleich**

Die amorphe Siliziumzelle ist zurzeit eine intensiv diskutierte Alternative zur polykristallinen Zelle. Die Vorzüge liegen auf der Hand: Die höhere optische Absorption von amorphem Silizium, die höhere Energiedichte, der viel geringere Materialaufwand, die einfachere und leichter automatisierbare Verfahrenstechnik für Dünnschichttechnik (etwa im Vergleich zum Sägen der Platten).

Nachteile: Bisher geringerer Wirkungsgrad, vor allem infolge zu hohem Innenwiderstand und reduziertem Photostrom. Die obere erreichbare mögliche Grenze des Wirkungsgrades ist nach wie vor umstritten und schwankt zwischen 8-15 Prozent. Was die Langzeitstabilität betrifft, hat man heute noch nicht die Sicherheit in der Vorhersage, wie wir sie von kristallinem Silizium her gewohnt sind. Die Beleuchtung führt oft zur Degradation, die aber durch Tempern wieder rückgängig gemacht werden kann. Da die langsame Ausdiffusion des Wasserstoffs die Zelle verschlechtert, muss die langfristige Stabilität besonders bei höheren Temperaturen (Wüstenklima) überprüft werden.

**Forschung und Entwicklung**

Zurzeit werden in der Forschung weltweit neben Verbesserungen an der eigentlichen Zelle zusätzlich mehrere Wege parallel verfolgt, um die Verwendung der Solarzellen für die grösste Stromerzeugung wirtschaftlicher zu machen:

- Konzentration des Sonnenlichts,
- Wirkungsgraderhöhung durch vorgeschalteten Spektralseparator,
- Solarzellen mit integrierter chemischer Energiespeicherung.

Anschliessend sollen diese drei Forschungsrichtungen übersichtsweise vorgestellt werden.

**Konzentration des Sonnenlichts**

Naheliegender ist die Idee, die Sonnenstrahlung, bevor sie auf die Solarzellen fällt, mit Hilfe von *Linsen* oder *Hohlspiegeln* zu konzentrieren. Auf diese Weise kann die gleiche elektrische Lei-

stung mit erheblich weniger Solarzellenfläche erhalten werden. Bild 3 führt ein Beispiel eines solchen Solargenerators vor Augen, der nur einen Viertel bis einen Drittel der Solarfläche eines konventionellen Generators gleicher Leistung benötigt. Die Spiegel sind in der Herstellung billiger als die entsprechend grössere Menge von Solarzellen, die ohne sie benötigt würde, so dass der Gesamtpreis weitaus niedriger liegt. Verwendungsgebiet für *fokussierende Solargeneratoren* dieser Art ist hauptsächlich die *Raumfahrt- und Satellitentechnik*.

Bei diffusem Licht, wie es auf der Erdoberfläche häufig vorkommt, können die Hohlspiegel keine Lichtkonzentration vornehmen. Um nun eine Konzentration auch bei bedecktem Himmel erreichen zu können, ist ein anderes Konzept erarbeitet worden: Die *Fraunhofer Gesellschaft in Freiburg i. Br.* macht gegenwärtig Versuche mit sogenannten *Fluoreszenzkollektoren* (Bild 4). Eine transparente Glas- oder Plexiglasplatte ist mit einem oder mehreren fluoreszierenden Farbstoffen dotiert. Diese absorbieren einfallendes Sonnenlicht und strahlen es nach allen Seiten gleichmässig mit einer etwas grösseren Wellenlänge wieder ab. Wegen der Totalreflexion kann nur ein kleiner Teil davon die Platte an der Oberfläche wieder verlassen, und der Hauptanteil breitet sich innerhalb der Platte aus und verlässt das Glas entlang den Kanten. Dort sind ringsherum Solarzellen angebracht. Da ihre Gesamtoberfläche erheblich kleiner sein kann als die der Kollektoroberfläche, wird das Gesamtsystem günstiger, als wenn man die bestrahlte Oberfläche ganz mit Zellen abdecken würde.

Neben der Konzentrationswirkung des Fluoreszenzkollektors ist ferner seine *spektrale Selektivität* vorteilhaft. Wählt man einen geeigneten Fluoreszenzstoff aus, so erhält man seitlich austretendes Licht mit einer schmalen spektralen Breite. Koppelt man diesen Lichtstrom an Solarzellen, die hier ihre grösste Empfindlichkeit haben, so wird wenig Energie in Wärme umgewandelt, so dass der Wirkungsgrad entsprechend hoch wird. In der Praxis wird man daher einen Stapel mit verschiedenen dotierten Fluoreszenzplatten hintereinanderreihen, wobei jede der Platten einen anderen Spektralbereich absorbieren und konzentriertes Licht unterschiedlicher Wellenlänge an die entsprechenden Solarzellen abstrahlen wird (Bild 5).

**Wirkungsgraderhöhung durch vorgeschalteten Spektralseparator**

Dass der *Wirkungsgrad* aller Solarzellenarten so *niedrig* ist, beruht unter an-

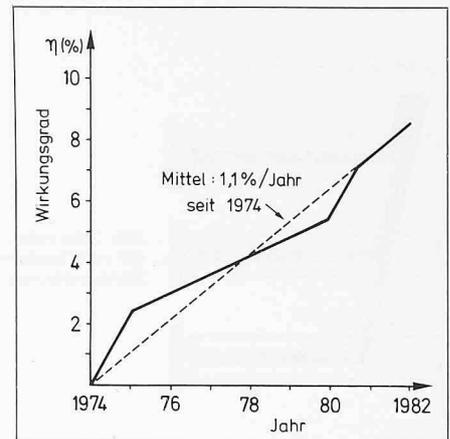


Bild 2. Verbesserung des Wirkungsgrades amorpher Silizium-Solarzellen als Folge von jahrelangen Forschungsanstrengungen (Quelle: RCA Labs., USA, sowie japan. Forschungsgruppen [9])

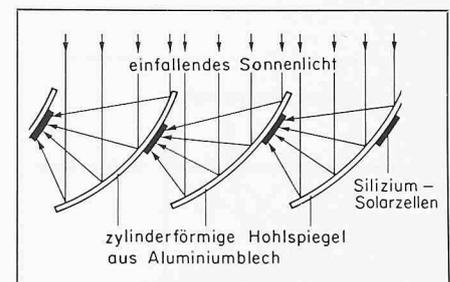


Bild 3. Durch Fokussierung der Lichtstrahlen lässt sich die gleiche Leistung wie bisher mit einem Viertel bis einem Drittel der Solarzellenfläche erzeugen. Die Hohlspiegel selbst wirken dabei als Wärmeableiter für die Solarzellen [11]

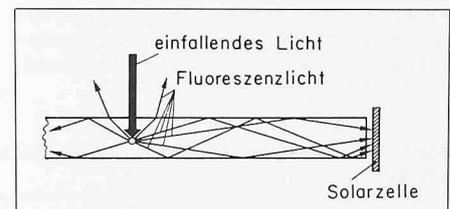


Bild 4. Prinzip eines Fluoreszenzkollektors. Der grösste Teil des Fluoreszenzlichtes gelangt wegen der Totalreflexion entlang der Glasfläche zu den Kanten, wo sich Solarzellen befinden. Dieser Kollektortyp kann auch diffuses Sonnenlicht «einsammeln»

derem darauf, dass ein grosser Teil der absorbierten Strahlung in *Wärme* umgesetzt und gar nicht zur Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren genutzt werden kann. Wendet man nämlich die Prinzipien der Thermodynamik auf das Licht an, so findet man, dass das direkte Sonnenlicht bei Umgebungstemperatur maximal zu 93 Prozent und das diffuse Licht zu 70 Prozent in mechanische oder elektrische Energie umgewandelt werden kann [3]. Leider kann die Zelle aus dem breiten Strahlungsspektrum des Sonnenlichts nur einen kleinen Ausschnitt verarbeiten. Bei monochromatischer Einstrahlung mit der richtigen Wellenlänge wäre der Wirkungsgrad viel höher. Um nämlich einen maximalen Wirkungsgrad erzielen zu können, muss die Quantenenergie der

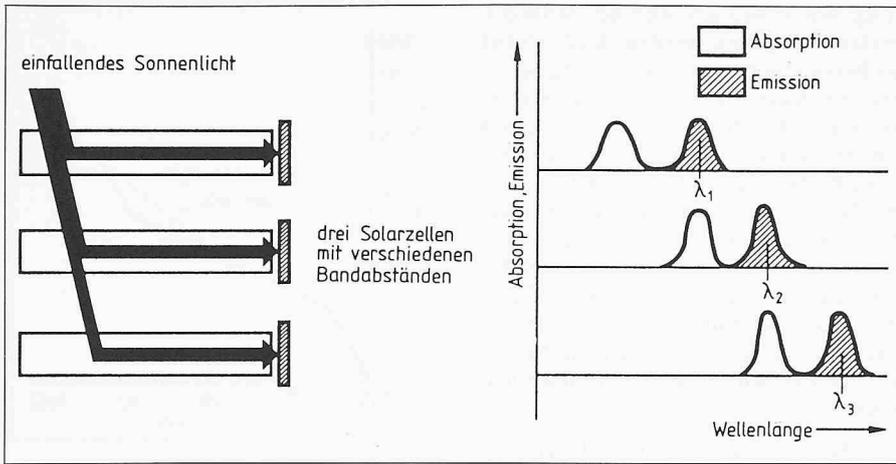


Bild 5. Drei Fluoreszenzkollektor-Platten im Stapel. Jede der Platten setzt nur einen bestimmten Wellenlängenbereich um (links), so dass sich die Spektralbereiche so ergänzen, dass der grösste Teil des Sonnenspektrums ausgenutzt werden kann [2, 3]

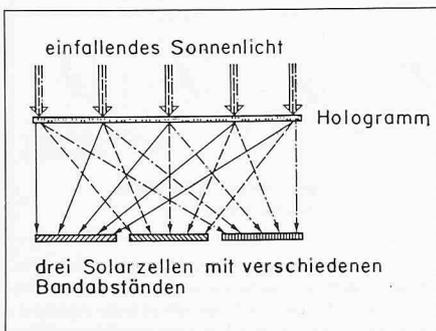
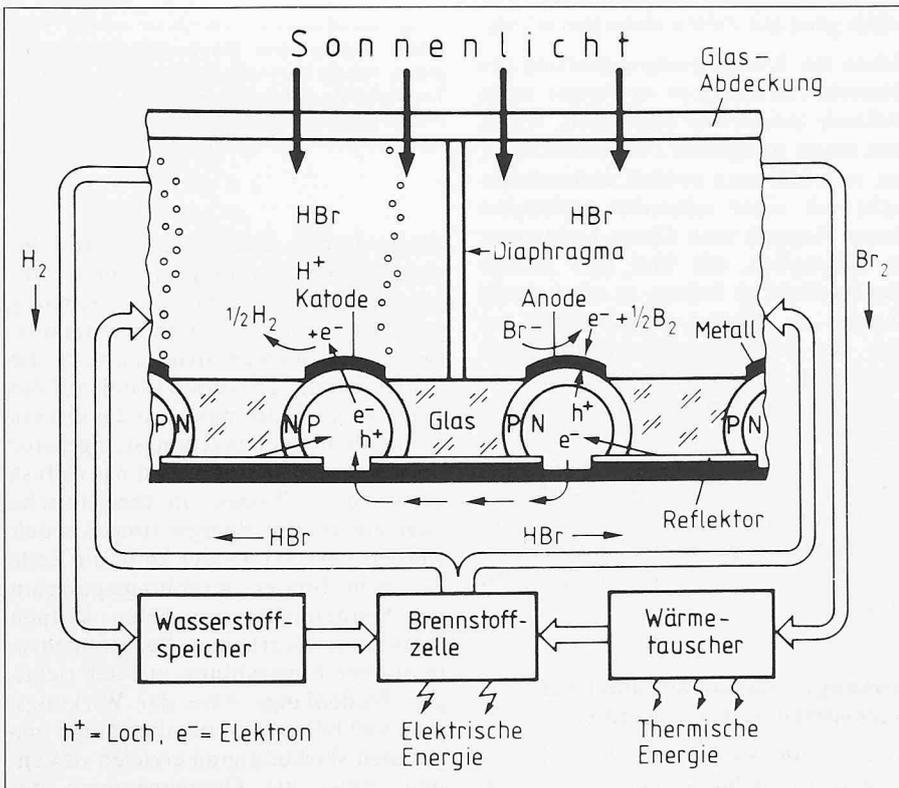


Bild 6. Ein speziell angefertigtes Hologramm teilt das einfallende Sonnenlicht in verschiedene Spektralanteile auf und fokussiert diese auf mehrere Solarzellen aus Halbleitern mit geeigneten Bandabständen. Der praktisch erreichte Gesamtwirkungsgrad liegt heute bei über 30 Prozent [12]

Strahlung zum Bandabstand des Halbleitermaterials passen: Ist sie zu klein, werden keine Ladungsträger, sondern nur Wärme erzeugt, und ist sie grösser als notwendig, geht der Überschuss ebenfalls in Form von Wärme verloren. So kommt es, dass jede Solarzellenart nur in einem bestimmten, relativ schmalen Wellenlängenbereich einen maximalen Wirkungsgrad aufweist, abhängig vom Bandabstand des verwendeten Halbleiters. Wenn man das einfallende Licht in mehrere Spektralbereiche aufteilt und auf verschiedene Solarzellen fallen lässt, kann man den Gesamtwirkungsgrad des Systems wesentlich steigern (Bild 6). Nach Prof. Bucher

Bild 7. Die elektrolytische Solarzelle von Texas Instruments mit Speicher, Wärmetauscher und Brennstoffzelle (Details siehe Text)



ist es schon bei einem Tandem-System mit zwei geeignet kombinierten Solarzellentypen möglich, einen praktisch erprobten Gesamtwirkungsgrad von mehr als 30 Prozent und bei einem vorgeschalteten Sonnenlichtkonzentrator (Faktor 1000) Werte von mehr als 41 Prozent zu erzielen.

### Solarzellen mit integrierter chemischer Energiespeicherung

Was die Nutzung der Sonnenenergie nach wie vor immer noch kostspielig macht, sind neben den Solarzellen selbst die erforderlichen Akkumulatoren zur Zwischenspeicherung der Energie. Eine bedeutende Verbilligung könnte hier möglicherweise eine Neuentwicklung von Texas Instruments bringen, die die aus Sonnenlicht gewonnene elektrische Energie zunächst chemisch speichert und erst bei Bedarf in Form von elektrischem Strom abgibt – auch zu Zeiten, wo kein Licht einfällt. Die Herstellung ist relativ einfach und preiswert, der Wirkungsgrad des Prototyps (Bild 7) erreichte bereits 13 Prozent.

Das physikalische Grundprinzip ist zunächst einmal dasselbe wie bei der bekannten Solarzelle. Allerdings sind hier die einzelnen Elemente nicht als Platten ausgeführt, sondern in Form von vielen kleinen Siliziumkugeln, die auf ihrer Oberfläche eine Sperrschicht und eine Metallelektrode tragen. Vor den Kugeln befindet sich in einigem Abstand eine Glasplatte, deren Zwischenraum mit Bromwasserstoffsäure (HBr) gefüllt ist. Bei Lichteinfall laden sich die Metallelektroden auf – und zwar, da es zwei Arten von Kugeln gibt, mit entgegengesetzter Polarität. Die Spannungsdifferenz erzeugt einen Strom, der die Bromwasserstoffsäure elektrolytisch in ihre Grundbestandteile Wasserstoff und Brom zerlegt. Die beiden Elemente werden separat gespeichert und bei elektrischem Energiebedarf in einer Brennstoffzelle wieder zu Bromwasserstoff vereinigt, womit sich der Kreislauf schliesst. Bemerkenswert ist, dass die Solarzelle sowie die Brennstoffzelle räumlich getrennt sein können. Gleichzeitig dient die Zelle aber auch noch auf einem zweiten Wege als Energielieferant: Durch die Sonneneinstrahlung erwärmt sich die Flüssigkeit in der Zelle. Das abgepumpte Brom fließt durch einen Wärmetauscher und gibt dort Niedertemperaturwärme an einen Wasserkreislauf ab. Es sei im besonderen darauf hingewiesen, dass diese Zellen alle oben aufgezählten Anforderungen zur wirtschaftlichen Produktion erfüllen: Massenproduktion möglich, keine Sägearbeiten wie bei mono- oder polykristallinen Zellen, kein Abfall bei der Herstellung der Siliziumkugeln usw.

## Entwicklungsziele

Seit 1973/74 konnte der Solarzellenpreis etwa um den Faktor zehn reduziert werden und liegt heute für Grossabnehmer um 20.- Fr./W<sub>peak</sub>. Der wirtschaftliche Durchbruch, bei dem der Strom aus Solarzellen in grossem Massstab für die weltweite Energieversorgung zu erwarten wäre, setzt aber – vergleicht man den resultierenden Strompreis mit dem heute durchschnittlichen Energiepreis – nochmals eine Verbilligung um etwa einen Faktor zehn voraus [4]. Alle Referenten der Tagung waren sich jedoch darin einig, dass dieses Ziel mit entsprechendem Forschungsaufwand zu erreichen wäre. Dabei habe sich – so Dr. Rasch von AEG, Heilbronn – die Anstrengung nicht nur auf die Zellenherstellung selbst zu konzentrieren, sondern sei auf das ganze Energiesystem auszudehnen. Er begründete seine Forderung damit, dass je etwa ein Drittel der Installationskosten auf das aufbereitete Ausgangsmaterial, die eigentliche Solarzellenherstellung sowie der Solargeneratoren (Modulzusammenstellung) entfalle.

Auf die Frage nach dem vieldiskutierten *Erntefaktor* dieser fertig installierten Technik angesprochen, meinte er, dass «Energierückzahlzeiten» von einem Jahr bis 1990 als Entwicklungsziel angestrebt werden.

### Literaturhinweise

- [1] Ebeling, W.D., Rex, D., Bierfischer, U.: «Properties of Solar Generators with Reflectors and Radiators», Proc. 2nd European Symp. «Photovoltaic Generators in Space», Heidelberg, 15.-17. April 1980, ESA SP-147, Juni 1980
- [2] Fraunhofer-Gesellschaft, Arbeitsgruppe für Solare Energiesysteme: Solarenergieumwandlung mit Fluoreszenzkollektor, Mitteilung, Freiburg 1981
- [3] Haas, O.: «Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Photovoltaik. Eine Alternative zur solarthermischen Elektrizitätserzeugung?» EIR-Würenlingen, TM-13-81-15, 1981
- [4] Köthe, H.K.: «Kostenentwicklung bei autonomen photovoltaischen Energieversorgungssystemen», etz Band 101, Heft 13, 1980
- [5] Löf, O.G., Duffie, J.A., Smith, C.O.: «World Distribution of Solar Radiation». Solar Energy Laboratory, Report No. 21, University of Wisconsin, July, 1966
- [6] Mathöfer, H.: «Forschung aktuell: Energiequellen für morgen?» Umschau Verlag, 1976
- [7] Müller, R.: «Grundlagen der Halbleiter-Elektronik, Springer-Verlag, 1979
- [8] Palz, W.: «Solar Electricity – an Economic Approach to Solar Energy». Commission of the European Communities, Brussels, UNESCO, 1978
- [9] Proceedings zur Informationstagung über «Photovoltaische Energieumwandlung» an der ETH, 15. April 1982, bei: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Vereinsverwaltung, Postfach, 8034 Zürich
- [10] Rattin, E.J.: «Overview of Photovoltaic Market Studies». The Aerospace Corporation Report No. ATR-78 (7694-05)-1 El Segundo, Calif., 1978
- [11] Rex, D.: «Solarzellenanlage mit konzentrierten Spiegeln und Radiatorflächen». Z. Flugwiss. Weltraumforsch. 1, Heft 3, S. 210–212, 1977
- [12] Yoo, H.I., Iles, P.A., Leung, D.C., Hyland, S.: «Übersicht über alle Herstellungsverfahren von Solarzellen». Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialist Conf., S. 598–602, IEEE New York, 1981

Dr. Minder (Elektrowatt, Zürich) warnte abschliessend davor, die Grossserienproduktion von Solarzellen solange hinauszuschieben, bis ihre Verwendung bei uns mit konventionellen Energieträgern konkurrieren könne. Zu jenem Zeitpunkt wäre dann der Weltmarkt schon lange von ausländischen Zellenherstellern beherrscht, die heute schon jene Marktsektoren beliefern – er erwähnte im besonderen Schwellenländer (z.B. Costa Rica), die kein Hoch-

spannungsverbundnetz aufgebaut haben, sowie abgelegene Benützer (Oasen, Inseln) –, deren elektrische Energiepreise schon immer über unseren tiefen, europäischen Werten gelegen haben [10].

Adresse des Verfassers: U. Weidmann, Dipl. El.-Ing. ETH/SIA, 8355 Aadorf.