Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 109 (1991)

Heft: 13

Artikel: Neue photovoltaische Zellen: Entwicklung einer Zelle zur billigen und effizienten Erzeugung von Elektrizität aus Sonnenlicht

Autor: Grätzel, Michael

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-85912

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: 07.08.2025

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

Neue photovoltaische Zellen

Entwicklung einer Zelle zur billigen und effizienten Erzeugung von Elektrizität aus Sonnenlicht

In Anlehnung an die natürliche Photosynthese geht es hier um ein neues photovoltaisches System zur Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom. Diese Zellen werden durch einen Titandioxid-Anstrich gefertigt und versprechen daher um einen Faktor 10 billiger zu sein als die herkömmlichen Siliziumzellen. Gegenwärtig wird an einer weiteren Verbesserung der Wirkungsgrade gearbeitet, die zwar schon heute mit herkömmlichen Wirkungsgraden vergleichbar, bei (weit ausschlaggebenderen!) diffusen Lichtverhältnissen sogar besser als jene sind.

Primärprozesse der Photosynthese

Es wird ein neues photovoltaisches System zur Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom vorgestellt.

VON MICHAEL GRÄTZEL, LAUSANNE

Das Prinzip dieser Zelle steht im engen Zusammenhang zu den Primärvorgängen der natürlichen Photosynthese, die in Bild 1 näher erläutert werden. In den Pflanzen wird Sonnenlicht durch Chlorophyll absorbiert, das als lichtgetriebene molekulare Elektronenpumpe wirkt. Durch Lichtanregung entstehen energiereiche Chlorophyllmoleküle (Chl*), welche in der Lage sind, ein Elektron auf einen Elektronenakzeptor (Mediator M) zu übertragen.

Das Elektron wird danach noch an andere Mediatoren weitergegeben. Es wird also durch Licht eine Kette von Redoxreaktionen ausgelöst. Chlorophyll und die beteiligten Mediatoren, z. B. Pheophytin und verschiedene Chinone, sind auf solche Weise räumlich in den Chloroplasten angeordnet, dass der Elektronentransfer auf vektorielle Art vom inneren auf den äusseren Teil der photosynthetischen Membran stattfindet. Der transmembrane Redoxvorgang ist innerhalb von wenigen hundert Mikrosekunden beendet und führt zur lichtinduzierten Ladungstrennung. Die negative Ladung befindet sich auf der Aussenseite der Membran und wird von den Pflanzen letztlich zur Reduktion des biologischen Elektronenträgers NADP+ eingesetzt. Das hierbei gebildete NADPH wird seinerseits im Calvin-Zyklus zur Assimilation von Kohlendioxid gebraucht. Die auf der Innenseite der Membran in der Form von Chlorophyllkationen zurückbleibenden positiven Ladungen dienen zur Oxidation von Wasser zu Sauerstoff.

Molekulare Photovoltaik und künstliche Photosynthese

Unsere neu entwickelte photovoltaische Zelle imitiert die wichtigsten Prinzipien des Primärvorgangs der Photosynthese. Allerdings müssen die Komponenten des künstlichen Systems so gewählt werden, dass sie den hohen Stabilitätsanforderungen genügen, die bei der praktischen Anwendung gestellt werden. Ein photovoltaisches System sollte 20 Jahre lang ohne nennenswerten Leitungsabfall betriebsfähig sein. Bei lebendigen Systemen ist das Stabilitätsproblem von geringerer Bedeutung, da instabile Komponenten ständig erneuert werden können. Sowohl Chlorophyll als auch die Lipidmembran sind *in vitro labil* und können nicht ohne weiteres übernommen werden. In der künstlichen Photosynthese wird daher Chlorophyll durch ein *stabileres Sensibilisatormolekül (S)* ersetzt. Die Rolle des Sensibilisators ist die gleiche wie die des Chlorophylls: Er soll das einfallende Sonnenlicht absorbieren und die Lichtenergie zur Auslösung von Elektronentransferreaktion ausnutzen.

Anstelle der biologischen Lipidmembran kommt eine keramische Membran aus Titandioxid zum Einsatz. Titandioxid (TiO_2) ist ein Halbleiter, der aufgrund seiner grossen Bandlücke (etwa 3 eV) kein sichtbares Licht absorbiert. Es ist ein völlig harmloses und umweltfreundliches Produkt, das sich durch seine sehr hohe Stabilität auszeichnet. Titandioxid kommt in der Natur als Ilmenit vor und wird im grossen Massstab als weisse Anstrichfarbe und als Zusatz für Zahnpasten angewendet. Die jährliche Produktion beträgt weltweit rund 10 Mio Tonnen, und der Preis liegt um 1 US$/kg. Da die Membran etwa 5 µm dick ist, werden zur Beschichtung von einem m² Sonnenkollektoroberfläche rund 10 g Titandioxid gebraucht, was einen Kostenaufwand von nur 0,01 $/m² entspricht.

Die lichtgetriebene Elektronenpumpe

Wie bei der natürlichen Photosynthese wird durch das Sonnenlicht in unserer Zelle eine molekulare Elektronenpumpe in Gang gesetzt, deren Prinzip schematisch in Bild 2 dargestellt wird. Der Sensibilisator (S) ist als mono-molekulare Schicht auf der Oberfläche der Titandioxid-Membran gebunden. Er absorbiert die einfallenden Sonnenstrahlen und wird dabei in den elektronisch angeregten Zustand S* versetzt. Aus diesem Zustand injiziert er ein Elektron in das Leitungsband des Titandioxids. Die Leitungsbandelektronen überqueren die Membran innerhalb von weniger als 100 µs und werden über einen Ladungskollektor in den äusseren Stromkreis gebracht, wo sie elektrische Arbeit verrichten.

Die Elektronen werden dann über eine Gegenelektrode in die Zelle zurückgeführt. Zwischen der Gegenelektrode

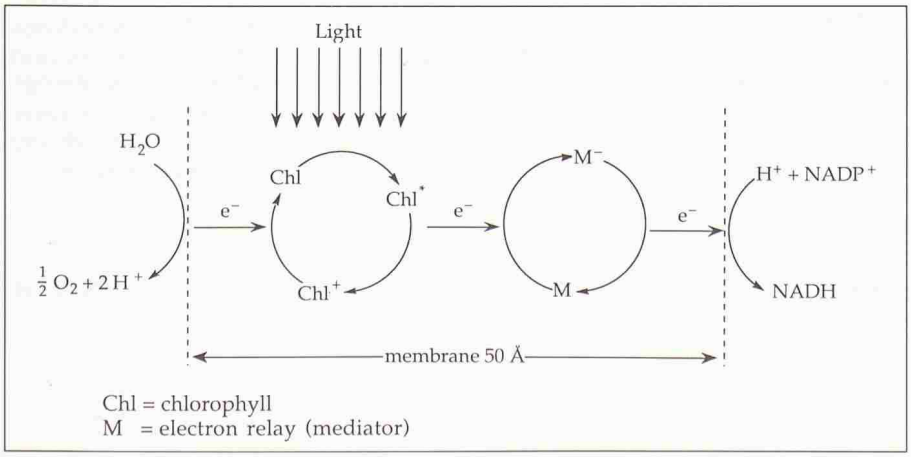

Bild 1. Prinzip der lichtgetriebenen molekularen Maschine der Chloroplasten in der natürlichen Photosynthese

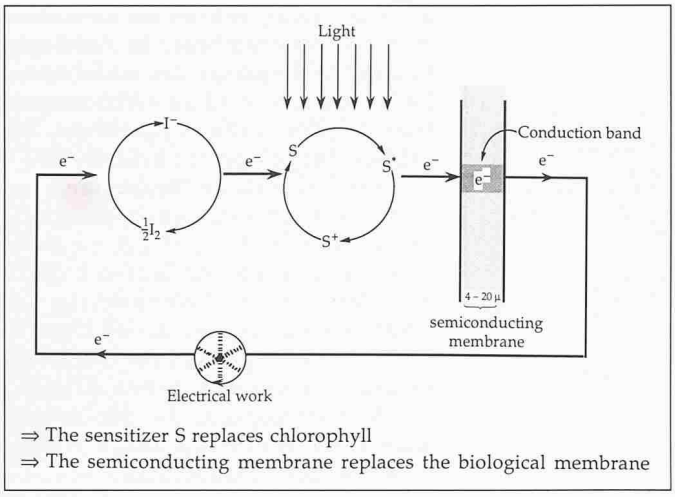

Bild 2. Künstliche Photosynthese: Eine molekulare Elektronenpumpe wird durch Sonnenlicht angetrieben

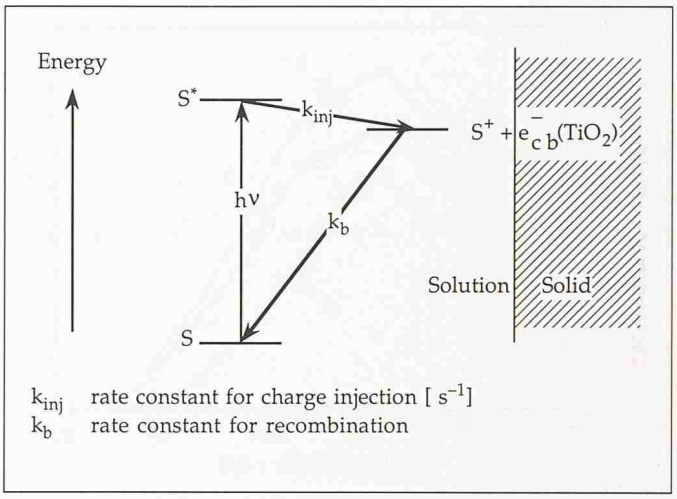

Bild 3. Photoinduzierte Ladungstrennung an der Oberfläche von TiO_2

und der Titandioxid-Membran befindet sich ein Elektrolyt, der Iodid und Iod enthält. Die Aufgabe dieses Redoxelektrolyten ist es, elektrische Ladung zwischen den beiden Elektroden zu transportieren. Die Elektronen reduzieren Iod zu Iodidionen. Diese diffundieren von der Gegenelektrode zur Titandioxid-Membran, wo durch Elektronentransfer auf das Sensibilisatorkation der Sensibilisator regeneriert und Iodid wieder zu Iod oxidiert wird. Damit schliesst sich der Zyklus der Redoxreaktionen, die zur Umwandlung von Licht in elektrischen Strom führen.

Im direkten Sonnenlicht führt jedes Sensibilisatormolekül etwa 20 Zyklen pro Sekunde aus. Die Frequenz der molekularen Maschine beträgt also 20 Hz.

Lichteinfang durch molekulare Schichten

Bei der Absorption von Sonnenstrahlen durch Sensibilisatoren, die an der Oberfläche der Titandioxid-Membrane haften, stellt sich das Problem des geringen Lichteinfangquerschnitts (σ) der Farbstoffmoleküle. Dieser errechnet sich aus dem dekadischen Extinktionskoeffizienten (Lambda) nach der Formel:

(1) $\sigma(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \times 1000/N_A$

mit $N_A = 6 \times 10^{23}$. Typische Werte für den dekadischen Extinktionskoeffizienten von Farbstoffen liegen zwischen 10^4 und 10^5 M^{-1} cm^{-1}. Dies entspricht einem Lichteinfangsquerschnitt zwischen 0,16 und 1,6 A^2. Demgegenüber besetzt das Sensibilisatormolekül auf der Oberfläche der Membran eine Fläche von rund 100 A^2. Man sieht aus diesen Vergleich, dass der Oberflächenbedarf des Sensibilisators mindestens 60mal grösser ist als sein Lichteinfangsquerschnitt.

Das bedeutet, dass eine mono-molekulare Schicht des Sensibilisators auf einer glatten Oberfläche im Wellenlängenbereich des Absorptionsmaximums höchstens 2% des einfallendes Lichts absorbiert. Man könnte natürlich daran denken, mehrere molekulare Schichten des Sensibilisators auf die Halbleitermembran aufzutragen, um damit die Lichtabsorption zu erhöhen. Dieser Versuch würde allerdings fehlschlagen, da die äusseren Schichten des Farbstoffs nur als Lichtfilter wirken und keinen Beitrag zur elektrischen Stromerzeugung liefern. Die Verwendung mono-molekularer Schichten des Sensibilisators ist demnach unumgänglich.

Eine erfolgreiche Strategie zur Lösung des Problems der Lichtabsorption durch solche extrem dünnen Schichten besteht in der Verwendung von strukturierten Titandioxid-Membranen [1, 2, 3]. So lassen sich mit Hilfe der Sol-Gel-Methode durchsichtige Membrane herstellen, die aus kolloidalen Titandioxid-Teilchen mit einem Durchmesser von 10–20 nm bestehen. Der elektronische Kontakt zwischen den Partikeln wird durch kurzes Sintern bei rund 500 °C hergestellt [2]. Man erzeugt damit eine mikroporöse Struktur mit einer sehr grossen effektiven Oberfläche. Zum Beispiel ist die effektive Oberfläche eines 5 µm dicken Films einer solchen kolloidalen Struktur mindestens 300fach grösser als die einer glatten Membran. Auf die projizierte Oberfläche bezogen erreicht man bei Verwendung der kolloidalen Membran eine Sensibilisatorkonzentration von $\Gamma = 3 \times 10^{16}$ Moleküle/cm^2. Die optische Dichte:

(2) $OD(\lambda) = \Gamma \times \sigma(\lambda)$

berechnet sich für diesen Bedeckungsgrad und einen Lichteinfangsquerschnitt pro Sensibilisatormolekül von 1 $A^2 = 10^{-16}$ cm^2 zu 3. Der Wirkungsgrad des Einfangs von monochromatischem Licht der Wellenlänge λ durch die monomolekulare Sensibilisatorschicht (LEE(λ)) ergibt sich aus:

(3) $LEE(\lambda) = 1-10^{-\Gamma \times \sigma(\lambda)} = 1-10^{-OD(\lambda)}$.

Bei einer optischen Dichte von 3 werden somit 99,9% des Lichts durch den Sensibilisator eingefangen.

Die Quantenausbeute der Ladungsinjektion

Die Quantenausbeute der Ladungsinjektion (Φ_{inj}) gibt den Anteil der absorbierten Photonen an, die als Elektronen in das Leitungsband injiziert werden. Die Ladungsinjektion vom elektronisch angeregten Sensibilisator in das Leitungsband des Halbleiters steht in Kompetition mit anderen strahlenden oder strahlungslosen Desaktivierungsprozessen. Fasst man die Summe der Geschwindigkeitskonstanten letzterer Prozesse unter k_{eff} zusammen, so erhält man:

(4) $\Phi_{inj} = k_{inj}/(k_{eff} + k_{inj})$

Man muss sich nun vor Augen halten, dass die Desaktivierung des elektronisch angeregten Zustandes des Sensibilisators in der Regel sehr rasch abläuft. Typische k_{eff}-Werte liegen im Bereich von 10^6 bis 10^{10} s^{-1}. Um eine gute Quantenausbeute zu erzielen, sollte die Geschwindigkeitskonstante der Ladungsinjektion wenigstens 100mal grösser sein als k_{eff}. Das bedeutet, dass Injektionsgeschwindigkeiten bis zu 10^{12} s^{-1} erreicht werden müssen. In der Tat sind in den letzten Jahren Sensibilisatoren entwickelt worden, die diesen Anforderungen genügen. Diese Farbstoffe wurden mit funktionnellen Gruppen («interlocking groups»), wie z. B. Karboxylat oder Chelatgruppen, ausgestattet, welche neben der Bindung an die Titandioxidoberfläche noch eine ausgezeichnete elektronische Kupplung des Sensibilisators mit dem Leitungsband des Halbleiters bewirken. Mit solchen Molekülen liegen die Quantenausbeuten

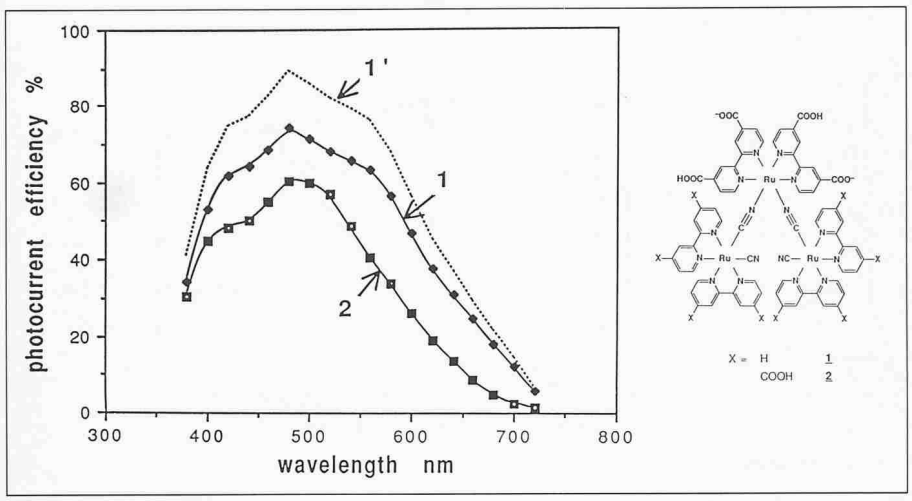

Bild 4. Aktionspektrum des Photostroms für TiO_2-Filme mit den trinuklearen Sensibilisatoren 1 und 2. Dünnschichtzelle mit LiI/I_2 Lösung in Ethanol als Elektrolyt

der Ladungsinjektion in der Regel über 90% [1, 2, 3].

Lichinduzierte Ladungstrennung und Stromausbeute

Als letzte Etappe zur Umwandlung von Licht in elektrischen Strom muss die Ladungstrennung erfolgreich vollzogen werden. Für das Elektron, das in die Leitungsbande der Titandioxid-Membran injiziert wurde, ist der aus thermodynamischen Gründen bevorzugte Weg die Rückreaktion mit dem Sensibilisatorkation (Bild 3). Diese Reaktion ist natürlich unerwünscht, da sie anstelle von elektrischen Strom Wärme erzeugt.

Zur Charakterisierung der Geschwindigkeit der Rekombination dient als wichtiger kinetischer Parameter die Geschwindigkeitskonstante k_b. Es ist von grossem Interesse, Sensibilisatorsysteme zu entwickeln, für die der k_{inj}-Wert hoch und der für k_b niedrig ist. Glücklicherweise ist bei den von uns eingesetzten Übergangsmetallkomplexen das Verhältnis k_{inj}/k_b oft grösser als 10^3, was die Ladungstrennung erheblich erleichtert.

Von grosser Bedeutung für die Verhinderung der Ladungsrekombination ist die Anwesenheit eines elektrischen Feldes in der Titandioxid-Membran. Dieses bildet sich durch spontanen Transfer von Elektronen aus dem Halbleiter in den Redoxelektrolyten, wenn beide in Kontakt gebracht werden. Der spontane Ladungstransfer findet deshalb statt, weil die energetische Lage des Ferminiveaus im Titandioxid höher ist als das Redoxpotential der Lösung. Der Verlust von Majoritätsladunsträgern hat zur Folge, dass sich im Titandioxid eine Raumladungszone (Verarmungsschicht) ausbildet [4]. Innerhalb dieser Schicht ist das Leitungsband gegen das Innere des Halbleiters gekrümmt. Kommt es nun zur Injektion von Elektronen durch den angeregten Sensibilisator, so bewirkt die Bandverbiegung, dass diese von der Oberfläche in das Innere der Membran abgesaugt werden. Die Geschwindigkeit der Rekombination wird durch diesen Effekt zusätzlich um etwa den Faktor 1000 herabgesetzt [2].

Drückt man mit η_e den Anteil der photoinduzierten Elektronen aus, die der Rekombination entkommen und in externen Stromkreis gelangen, so erhält man für die monochromatische Stromausbeute ($\eta_i(\lambda)$):

(5) $\eta_i(\lambda) = LEE(\lambda) \times \Phi_{inj} \times \eta_e$

Diese Stromausbeute entspricht dem Verhältnis von gemessenen elektrischen Strom zum einfallenden Photonenfluss bei einer bestimmten Wellenlänge. Durch Entwicklung geeigneter Sensibilisatoren und systematische Verbesserung der elektronischen Eigenschaften der Titandioxidmembran stehen jetzt Systeme zur Verfügung, für die alle drei Faktoren in Gleichung (5) praktisch 1 sind. Man erhält daher im Wellenlängenbereich der Absorptionsbande des Sensibilisators quantitative Umwandlung der einfallenden Photonen in Elektronen.

Ein Diagramm, welches die monochromatische Stromausbeute in Abhängigkeit der Wellenlänge des einfallenden Lichts darstellt, wird als «Aktionsspektrum des Photostroms» bezeichnet. Ein solches Aktionsspektrum ist in Bild 4 für zwei trinukleare Rutheniumkomplexe als Sensibilisatoren dargestellt [5]. Die gestrichelte Linie 1′ gilt für Komplex 1 und wurde aus Kurve 1 durch Korrektion des Lichtverlustes im leitenden Glas berechnet, das als Unterlage für den Titandioxid-Film diente. Sie verdeutlicht die sehr hohen Effizienz der Stromerzeugung, die mit solchen Komplexen über einen weiten Wellenlängenbereich 75% übertrifft.

Zellspannung und globale Umwandlungseffizienz

Die Photospannung unserer Zelle entspricht dem Unterschied des Ferminiveaus von Titandioxid und des Redoxpotentials der Elektrolyten (Bild 5). Bei Verwendung alkoholischer Iodid-Iodlösungen wurden bei offenen Stromkreis im vollen Sonnenlicht (890 W/m²) Zellspannungen von 0,7–1 Volt gemessen. Bei 1000fach kleinerer Lichtintensität liegt die Zellspannung um rund 200 mV niedriger, d.h. die relative Änderung der Zellspannung beträgt nur 20–30%. Im Falle von herkömmlichen Siliziumzellen sinkt die Zellspannung bei der gleichen LichtintensitätsVerminderung um den Faktor drei. Das zeigt, dass die Photospannung unsere Zelle gegenüber Lichtintensitätsschwankungen wesentlich unempfindlicher ist als die konventionelle Photovoltaik.

Die Gesamteffizienz η_{global} der photovoltaischen Zelle kann leicht aus der integralen Photostromdichte (i_{ph}), der Photospannung bei offenem Stromkreis (V_{oc}), dem Füllfaktor der Zelle (ff) und der Intensität des einfallenden Sonnenlichtes (I_s) errechnet werden.

(6) $\eta_{global} = i_{ph} \times V_{oc} \times ff / I_S$

Die integrale Photostromdichte ist seinerseits durch das Überlappungsintegral der spektralen Emission der Sonne $I_S(\lambda)$ mit der monochromatischen Stromausbeute gegeben:

(7) $i_{ph} = I_S(\lambda) \times \eta_i(\lambda)\, d\lambda$

Wird beispielsweise für die spektrale Emission der Sonne die AM1 Verteilung (globale Intensität 88,92 mW/cm²) angesetzt, so errechnet sich der integrale Photostrom aus dem Aktionsspektrum 1 in Bild 4 zu 11,09 mA/cm². Unter Benutzung der Mittelwerte von 0,85 V für V_{oc} und 0,7 für den Füllfaktor, erhält man als Voraussage für die Gesamteffizienz der Zelle den Wert von 7,45%.

Im Labor sind diese Voraussagen mit kleinen Zellen (Fläche 1,5 cm²) und si-

Literatur

[1] *M. Grätzel:* «Artificial Photosynthesis», Kapitel 7 des Buches «Frontiers of Science», Andrew Scott, Editor, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 1990.

[2] *B. O'Regan, J. Moser, M. Anderson,* and *M. Grätzel:* J. Phys. Chem. Soc. 1990, 94, 8720

[3] *N. Vlachopoulos, P. Liska, J. Augustynski,* and *M. Grätzel:* J. Am. Chem. Soc. 1988, 110 1216

[4] *H. Gerischer:* Electrochim. Acta 1990, 35, 1677

[5] *M. K. Nazeeruddin, P. Liska, J. Moser, N. Vlachopoulos,* and *M. Grätzel,* Helv, Chim. Acta 1990, 73, 1788

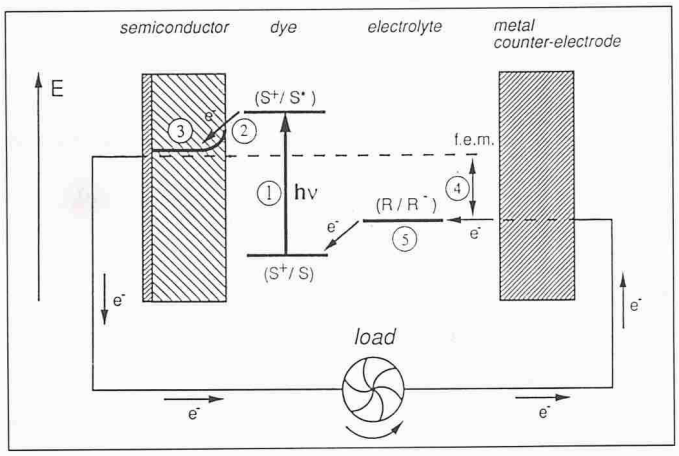

Bild 5. Schematische Darstellung einer regenerativen photoelektrochemischen Zelle zur Erklärung der Zellspannung

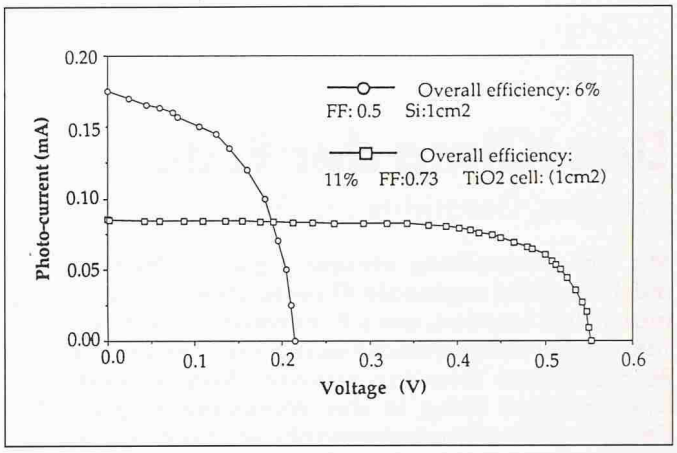

Bild 7. Vergleich der Strom-Spannungscharakteristik des TiO_2-Moduls mit einer herkömmlichen Siliziumzelle

mulierten AM1-Licht bestätigt worden. Die gemessenen Umwandlungseffizienzen lagen um 7%. Auf die mit grösseren Modulen erhaltenen Werte wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Entwicklung und Test der ersten Zellmodule

Inzwischen ist mit der Entwicklung und dem Test der ersten Zellmodule für die praktische Anwendung begonnen worden. Der Aufbau der Module wird in Bild 6 erläutert. Die Zelle besteht aus zwei Glasplatten 1 und 7, die mit einer elektrisch leitenden dünnen Zinndioxidschicht 2 und 6 bedeckt sind. Auf die eine Platte wird nach dem Sol-Gel-Verfahren die kolloidale Titandioxidschicht 5 aufgebracht, die sich durch einen hohen Rauhheitsfaktor auszeichnet und damit als Lichtfalle dient. Sichtbares Licht wird durch eine monomolekulare Schicht 4 eines geeigneten Übergangsmetallkomplexes eingefangen, der als Sensibilisator wirkt. Dieser injiziert nach Lichtanregung ein Elektron in die Leitungsbande von Titandioxid. Mit einem solchen System gelingt es, im Wellenlängenbereich des Absorptionmaximums des Sensibilisators über 80% der einfallenden Photonen in elektrischen Strom umzuwandeln. Die Elektronen gelangen über die Kollektorelektrode 6 in den äusseren Stromkreis, wo sie Arbeit verrichten. Sie werden dann über die Gegenelektrode 2 wieder der Zelle zugeführt. Die Sensibilisatorschicht 4 ist von der Gegenelektrode 2 durch den Elektrolyten 3 getrennt. Im Elektrolyten befindet sich ein Redoxsystem, z.B. Iod/Iodid, dessen Aufgabe es ist, die Elektronen von der Gegenelektrode auf die Sensibilisatorschicht zu transportieren, welche durch die Elektroneninjektion positiv aufgeladen wurde. Die Oberfläche dieser Module liegt zwischen 20 und 100 cm².

In Bild 7 vergleichen wir die Charakteristik eines 20 cm² grossen Moduls mit einer herkömmlichen Siliziumzelle unter Bestrahlung mit diffusen Tageslicht (wolkiger Himmel). Unsere Zelle hat eine um den Faktor zwei niedrigere Stromdichte, die jedoch durch eine 2,5fach höhere Spannung und einen wesentlich besseren Füllfaktor kompensiert wird, so dass am Ende ein Wirkungsgrad von 11% gegenüber 6% für die konventionelle Silizium-Zelle herauskommt.

Im direkten Sonnenlicht erhöhte sich die Umwandlungseffizienz der Siliziumzelle auf 12,5%, wohingegen die des Moduls auf knapp 6% absank. Die Verminderung der Ausbeute bei der hohen Lichtintensität ist auf die Veränderung der spektralen Lichtverteilung sowie die Ohmschen Verluste im leitenden Glas zurückzuführen. Eine weitere Ursache ist die Unebenheit der Glasplatten, die zur Diffusionslimitierung des Stromes an der Gegenelektrode (Iodreduktion) führen kann. Es handelt sich hierbei um relativ banale technische Probleme, deren Behebung keine schwerwiegenden Hindernisse bieten sollten. So wurden kürzlich im Labor ohne Schwierigkeiten Photostromdichten bis zu 25 mA/cm² mit sensibilisierten kolloidalen Schichten erzielt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im gegenwärtigen Stadium der Entwicklung die Gesamteffizienz der Module in AM1-Sonnenlicht um 6% liegt. Sie soll bis Ende 1991 auf 10% erhöht werden. Hauptangriffspunkt ist dabei die Verbesserung der spektralen Überlappung des Sensibilisators mit der solaren Emission. Im diffusen Licht oder bei bewölkten Himmel ist die Effizienz der Zelle erstaunlich hoch und übertrifft bereits die von herkömmlichen Siliziumzellen. Der Preis sollte mindestens um einen Faktor zehn kleiner sein als der von konventionellen Zellen.

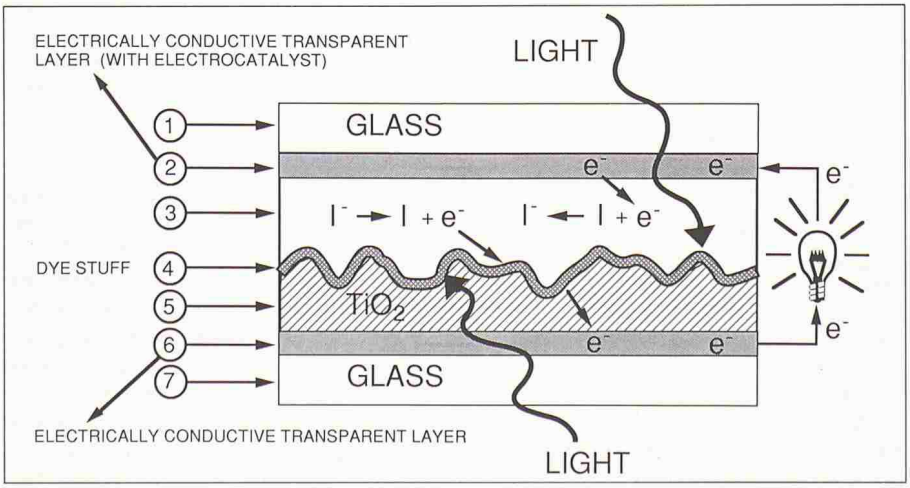

Bild 6. Aufbau eines Zellmoduls aus transparenten Glaselektroden

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *Michael Grätzel*, Institut für Physikalische Chemie, Eidgenössische Technische Hochschule, 1015 Lausanne.

Leicht überarbeitete Fassung des Referates gehalten anlässlich des 6. Status-Seminars «Energie im Hochbau», am 5. September 1990 in Zürich.