

Von der Babywindel zur transparenten Solarzelle

Neue photogalvanische Zellen mit Nano-Titandioxid

C. Bohrmann-Linde, S. Spinnen und P. Sahling

Ein hochaktuelles Anwendungsgebiet von Solarzellen ist die gebäudeintegrierte Photovoltaik. Hierfür werden transluzide oder transparente Solarzellen eingesetzt. Im Beitrag werden neue Schulexperimente zu langlebigen und zu transparenten Solarzellen auf Titandioxid-Basis vorgestellt.

Stichwörter: Solarzellen, Titandioxid, Halbleiter, gebäudeintegrierte Photovoltaik, Gelelektrolyte

1 Einleitung

Solarzellen sind aus dem Alltag der Schülerinnen und Schüler nicht mehr wegzu-denken. Dabei handelt es sich in der Regel um Silicium-basierte Solarzellen. In der Forschung befasst man sich bereits seit über 20 Jahren mit alternativen Materialien, die das unter hohem Energieaufwand zu gewinnende hochreine Silicium ablösen können [1]. Wegen seiner halbleitenden Eigenschaften und des vergleichsweise geringen Produktionspreises ist hierfür Titandioxid ein Kandidat der Wahl. Während es den meisten Menschen als Weißpigment in der Rutil-Modifikation bekannt ist, spielt es insbesondere in der photochemisch aktiveren Anatas-Modifikation eine Rolle als UV-Absorber, Photokatalysator oder hier als Material für siliciumfreie Solarzellen. Versehen mit einem geeigneten Farbstoff als Photosensibilisator wurden in der Forschung bereits semitransparente Titandioxid-basierte

Solarzellen entwickelt, die im Bereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik (building integrated photovoltaics, BIPV) Gebäudeflächen bedecken oder gar als Fensterersatz dienen könnten (Abb. 1).

Die Idee der gebäudeintegrierten Photovoltaik ist bestechend: Würden (notwendige) Bauteile von Häusern selbst aus Solarzellen bestehen, könnten sie lokal als kleine Kraftwerke fungieren. In einer aus BIPV-Elementen gebauten Garage könnten Elektroautos wieder aufgeladen werden, Hausbesitzer könnten durch in Fassaden, Fenster oder Verschattungsbauanteilen eingesetzte Solarzellen die Stromversorgung ihres Gebäudes selbst realisieren. Aufwendige Haltekonstruktionen würden verzichtbar, der Solarstrom könnte insgesamt günstiger werden. Die Notwendigkeit geeigneter Akkumulator-Systeme sei an anderer Stelle diskutiert. In einem Report des amerikanischen Marktforschungsinstituts Nanomarkets wurde geschätzt, dass das weltweite Marktvolumen der BIPV (auf der Basis von Glas) von 1,1 Mrd € in 2012 auf 4,8 Mrd € in 2016 steigen wird [2].

In diesem Beitrag werden anknüpfend an vorangegangene Arbeiten [3–6], welche die Möglichkeit bieten, mit schultauglichen Experimenten die Elementarprozesse bei der Photovoltaik, d.h. der Umwandlung von Licht in elektrischen Strom, erschließbar zu machen, nun neue Zellanordnungen beschrieben, die einerseits die über einen längeren Zeitraum betriebsfähig sind und mit denen andererseits der Anwendungsbezug zur gebäude-integrierten Photovoltaik ermöglicht wird.

2 Grundlagen und Zielsetzung

Das Herz der bisher beschriebenen Zellen bildet eine Photoelektrode mit dem Halbleiter Titandioxid in der Anatas-Modifikation, der als Suspension auf ein leitfähiges Glas aufgetragen und anschließend gesintert wird. Bei dem verwendeten Titandioxid handelt es sich um nanoskaliges Pulver (Hombikat UV100, Fa. Sachtleben), das ein mesoporöses Netzwerk bildet (Abb. 2) und somit eine große Oberfläche hat. Damit kann es gut vom verwendeten Elektrolyten, einer wässrigen Lösung von Ethylendiamintetraessigsäure-Dinatriumsalz (EDTA-Dinatriumsalz, im Folgenden als „EDTA“ abgekürzt), durchdrungen werden.

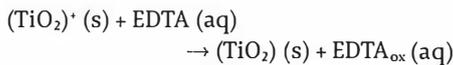
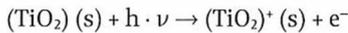
Im Halbleiter Titandioxid findet bei Lichteinstrahlung zunächst die Bildung von Elektron-Loch-Paaren statt [5]. Die in der Elektrolyt-Lösung enthaltenen EDTA-Teilchen können die gebildeten Löcher „stopfen“ und werden dabei oxidiert. Das ist eine Voraussetzung dafür, dass die angeregten Elektronen die Photoelektrode verlassen und in den äußeren Stromkreis übergehen. Es entstehen Photospannung und Photostrom.

Die Vorgänge an der Photoelektrode können vereinfacht wie folgt formuliert werden:



Abb. 1: Gebäudeintegrierte Photovoltaik als Fassadenbauteil: teiltransparente Photovoltaik-Module PV-Shade® in Fensterfront

Foto: Fraunhofer ISEI



Als Gegenelektroden fungieren gebrauchte Rasierscherfolien von Markenrasierern, die mit einer dünnen Schicht Platin überzogen und somit als low-cost-Platinelektroden einsetzbar sind. An der Gegenelektrode findet durch eintreffende Elektronen die Reduktion einer weiteren Spezies aus der Elektrolyt-Lösung (Wasser-Moleküle oder Protonen, je nach pH-Wert der Lösung) statt.

Kompaktzellen aus den genannten Komponenten sind fast trockene Zellanordnungen, mit denen ein kleiner Motor betrieben werden kann [6]. In einer Unterrichtsreihe, die ausgehend von galvanischen Elementen über photogalvanische Zellen hin zu kompakten Solarzellen führt [3], sind sie wegen ihres vergleichsweise einfachen Aufbaus bei hoher Leistung sehr gut einsetzbar. Als „Ersatz-Fenster-scheiben“ sind sie hingegen nicht geeignet, da sie weder transluzid noch transparent sind.

Ein weiterer, grundsätzlich zu optimierender Aspekt betrifft die mögliche Betriebsdauer der Solarzellen. Sämtliche Varianten werden mit wässrigen Lösungen, meist EDTA-Dinatriumsalz-Lösung, als Elektrolyt versetzt. Die EDTA-Lösung fungiert einerseits wie oben beschrieben am Minuspol als Elektronendonator, andererseits stellt sie Protonen zur Verfügung, die bei Kurzschlussbedingungen am Pluspol zu Wasserstoff-Molekülen reduziert werden.

Nach einiger Betriebsdauer kommt es zum Austrocknen der Zellen, begleitet vom Auskristallisieren von EDTA. Eine Versiegelung der Zellen ist wegen der Verwendung eines Opferdonors nicht sinnvoll.

Das Ziel war es also, kompakte Titandioxid-basierte Solarzellen herzustellen, die einerseits länger haltbar und die andererseits hinsichtlich des Anwendungsbezugs zur BIPV möglichst transparent sind.

3 Versuche zu länger haltbaren Kompaktzellen: Einsatz von Gel-Elektrolyten

3.1 SAP-Gel-Elektrolyt

Da aus dem Elektrolyten verdunstendes Wasser die Funktionsfähigkeit der Zellen begrenzt, wurde eine Methode zur Verlangsamung dieses Prozesses gesucht. Dabei fiel zunächst die Wahl auf den Zusatz von Superabsorbent (SAP). Superab-

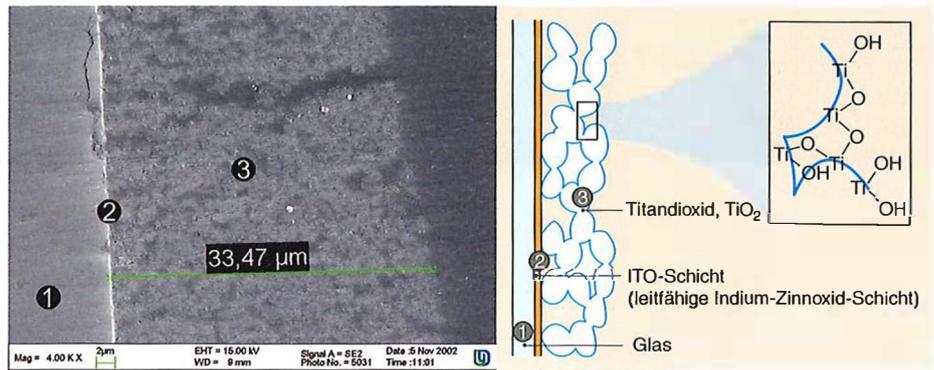


Abb. 2: Querschnitt durch eine Titandioxid-Photoelektrode. Die Nanopartikel bilden ein mesoporöses Netzwerk aus.

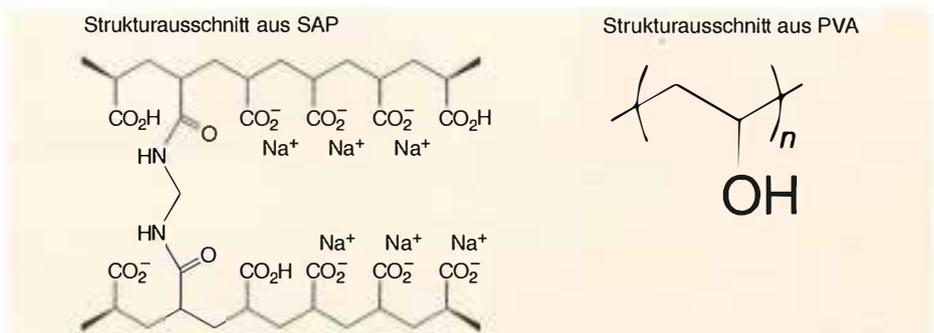


Abb. 3: Superabsorbent und Polyvinylalkohol können als gelbildende Substanzen für die Elektrolytpaste eingesetzt werden.

sorber sind quellbare, polymere Substanzen, die ein Vielfaches ihres Eigengewichts an wässrigen Lösungen unter Bildung eines Gels aufnehmen können. Sie finden häufig Verwendung in Babywindeln und bei der Inkontinenzversorgung, für Verbandmaterialien oder aber als Material für die Ummantelung von Tiefseekabeln. Chemisch gesehen handelt es sich um teilneutralisierte Polyacrylatketten, die durch Quervernetzer miteinander verbunden sind und so ein Polymernetzwerk bilden (Abb. 3). In dieses Netzwerk können Wassermoleküle eingelagert und Kationen durch intermolekulare Wechselwirkungen mit den Carboxylat-Gruppen eingebunden werden. Das Quellvermögen ist u.a. abhängig vom Anteil der Quervernetzer (Vernetzungsgrad), von der Art der in der Lösung vorhandenen Kationen und vom pH-Wert der Lösung (optimale Quellung bei pH = 8, [7]).

Für den Einsatz in einer Titandioxid-Kompaktzelle wurde ein EDTA-SAP-Gel hergestellt, indem man etwas SAP-Pulver mit EDTA-Lösung versetzt und quellen lässt. EDTA und Superabsorbent reagieren nicht miteinander. Auch die Leistungsfähigkeit des Elektrolyten in der Zelle wird nicht beeinträchtigt. Durch Einsatz des Gel-Elektrolyten ist die Zelle nun statt nur innerhalb weniger Stunden auch nach einer Woche Lagerung wieder einsatzfähig.

Versuch 1: SAP-Gel-Solarzelle

Materialien: Titandioxid-Photoelektrode, Superabsorbent (z.B. Firma BASF), EDTA-Dinatriumsalz-Lösung ($c = 0,2 \text{ mol/L}$, mit NaOH (aq) neutralisiert; wird unter der Bezeichnung Titriplex III zur Wasserhärtebestimmung eingesetzt), Filterpapier, Rasierscherfolien, 1 Stück Flachglas, 2 Foldback-Klammern, 2 Kabel, 2 Krokodilklammern, Multimeter, Lichtquelle (z.B. Sonne, Diaprojektor oder Ultravitalux-Lampe, Firma Osram, Produktnr. 4050300003313; Preis ca. 30 €; Sicherheitshinweis: Um die Augen zu schützen, darf nicht direkt in das Licht der Lampe geschaut werden), Elektromotor (Solar-motor mit Glockenanker, Preis ca. 20 €; Bezugsquelle: Lehnert Modellbau Solartechnik GmbH; unter www.lemo-solar.de; Anlaufspannung von $U = 0,1 \text{ V}$ und Leerlaufstrom von $I = 2 \text{ mA}$).

Die Herstellung der Photoelektrode erfolgt nach [8].

Durchführung: Man beträufelt 0,5 g (kleine Spatelspitze) SAP mit einer wässrigen EDTA-Dinatriumsalz-Lösung und lässt ca. 2 Minuten quellen. Die Titandioxid-Schicht der Photoelektrode wird passgenau mit einem Stück Filterpapier bedeckt. Der EDTA-SAP-Gelelektrolyt kann nun mit einem Spatel auf das Filterpapier gestrichen werden. Zwei Rasierscherfolien werden mit der gewölbten

Messungen	Messergebnisse am schattigen Laborplatz		Messergebnisse bei Bestrahlung mit einer Ultravitalux-Lampe (ca. 10 cm Entfernung zur Photoelektrode)	
	Spannung U [V]	Stromstärke I [mA]	Spannung U [V]	Stromstärke I [mA]
am Tag des Aufbaus der Zelle	0,001	0,5	0,511	$I_{\max.} = 9,6$ $I_{\text{konst.}} = 5,6$
nach einem Tag	0,038	0,4	0,485	$I_{\max.} = 8,2$ $I_{\text{konst.}} = 4,6$
nach 2 Tagen	-0,003	0,4	0,476	$I_{\max.} = 12,4$ $I_{\text{konst.}} = 5,8$
nach 3 Tagen	-0,072	0,4	0,524	$I_{\max.} = 10,9$ $I_{\text{konst.}} = 4,6$
nach 6 Tagen	0,000	0,3	0,508	$I_{\max.} = 5,6$ $I_{\text{konst.}} = 2,4$
nach 7 Tagen	-0,153	0,3	0,538	$I_{\max.} = 5,3$ $I_{\text{konst.}} = 2,2$
nach 9 Tagen	0,051	0,4	0,515	$I_{\max.} = 2,0$ $I_{\text{konst.}} = 1,2$
nach 13 Tagen	0,109	0,3	0,505	$I_{\max.} = 0,8$ $I_{\text{konst.}} = 0,6$

Tab. 1: Messergebnisse zur Kompaktzelle mit PVA-EDTA-Gelelektrolyt [9]

Seite nach unten so auf das Glas gelegt, dass sich die Scherfolien berühren und eine der Scherfolien über die Gasplatte hinaus ragt. Anschließend legt man ein Stück Flachglas auf die Scherfolien, wobei die Photoelektrode an einer Seite hervorragen muss und fixiert die Zelle mit zwei Foldback-Klammern (vgl. Abb. 4). Für die Messungen werden die jeweils überstehenden Teile der Photoelektrode und der Rasierscherfolie mit Krokodilklemmen und Kabeln kontaktiert. Die Zelle wird mit einer Lichtquelle bestrahlt und intervallweise abgedunkelt, womit die Zelle auf Photosensibilität getestet wird.

Nachdem eine maximale Zellspannung erreicht ist, verbindet man bei andauernder Bestrahlung die Kabel mit einem kleinen Elektromotor.

Ergebnis: Bei Bestrahlung der Zelle mit einer Ultravitalux-Lampe misst man eine

Photospannung von ca. $U = 800 \text{ mV}$ und einen Photostrom von ca. $I = 3,5 \text{ mA}$. Die Zelle ist photosensibel, d.h. Photospannung bzw. -strom bauen sich bei Lichteinstrahlung auf und fallen bei Abdunkelung ab. Bei Bestrahlung lässt sich mit der Zelle ein kleiner Motor betreiben.

Im Gegensatz zu Kompaktzellen ohne SAP liefert die Zelle auch nach einer Woche noch bei Bestrahlung Photospannung und Photostrom. Allerdings sinkt insbesondere die Stromstärke stark ab und der Motor kann nur am Folgetag betrieben werden.

3.2 PVA-Gel-Elektrolyt

Eine weitere Substanz, die mit wässrigen Lösungen Gele bildet, ist Polyvinylalkohol, PVA. Polyvinylalkohol (B3) zählt zu den thermoplastischen Polymeren. Es wird durch Hydrolyse von Polyvinylestern

gewonnen. Eine direkte Polymerisation des entsprechenden Alkohols Ethanol gelingt nicht, da dieser im Wesentlichen in seiner tautomeren Form als Acetaldehyd vorliegt. Je nach Herstellungsverfahren liegt PVA in unterschiedlichen Hydrolysegraden vor.

Polyvinylalkohol ist wasserlöslich und findet u.a. Verwendung als Bindemittel, als Rasiercreme- und Seifenzusatz, als Verdickungsmittel in pharmazeutischen und kosmetischen Präparaten, als Barrierschicht für Kohlenstoffdioxid bei PET-Flaschen oder in künstlicher Tränenflüssigkeit.

Für den Einsatz in einer Titandioxid-Kompaktzelle wurde ein PVA-EDTA-Gel hergestellt, indem man zunächst eine PVA-Lösung ($w = 20\%$) unter Erwärmen ansetzt. Nach anschließendem Stehenlassen wird die Lösung schaumfrei und klar und kann unter gelindem Rühren mit EDTA-Dinatriumsalz versetzt werden. (Wenn man PVA-Pulver in EDTA-Lösung einrührt, entsteht sofort ein gummiartiger Feststoff, der nicht weiter verarbeitet werden kann.) Das PVA-EDTA-Gel ist luftdicht verschlossen mehrere Wochen lagerbar. Bei Einsatz des PVA-EDTA-Gelelektrolyten in der Titandioxid-Kompaktzelle kann man mit der Zelle den Elektromotor sogar noch nach 7 Tage antreiben (Tab. 1).

Versuch 2: PVA-Gel-Solarzelle nach S. Ruckebier [9] (ein Video zum Bau und Betrieb der Zelle ist unter [8] abrufbar)

Materialien: PVA-EDTA-Gelelektrolyt, Mullbinde; weitere Materialien wie in Versuch 1.

Durchführung: Man stellt eine wässrige PVA-Lösung ($w = 20\%$; aus 24 mL dest. Wasser und 6 g PVA) her und fügt entsprechend der Zielkonzentration von $c = 0,5 \text{ mol/L}$ 4,5 g EDTA-Dinatriumsalz unter Rühren zu.

Die Titandioxid-Schicht der Photoelektrode wird zweilagig mit einem Stück Mullbinde bedeckt. Darauf streicht man das PVA-EDTA-Gel vorsichtig mit einem Spatel auf. Das weitere Vorgehen entspricht dem aus Versuch 1.

Ergebnis: Bei Bestrahlung mit einer Ultravitalux-Lampe im Labor zeigt sich auch hier, dass die PVA-EDTA-Zelle photosensibel ist. Man erhält Messwerte um $U = 500 \text{ mV}$ für die Photospannung und um $I = 5 \text{ mA}$ für den Photostrom und kann einen Elektromotor antreiben. Erst nach neun Tagen reicht die Leistung der noch immer photosensiblen Zelle nicht mehr für den Motorantrieb aus. Damit stellen sich Zellen mit PVA-EDTA-Gelelektrolyt

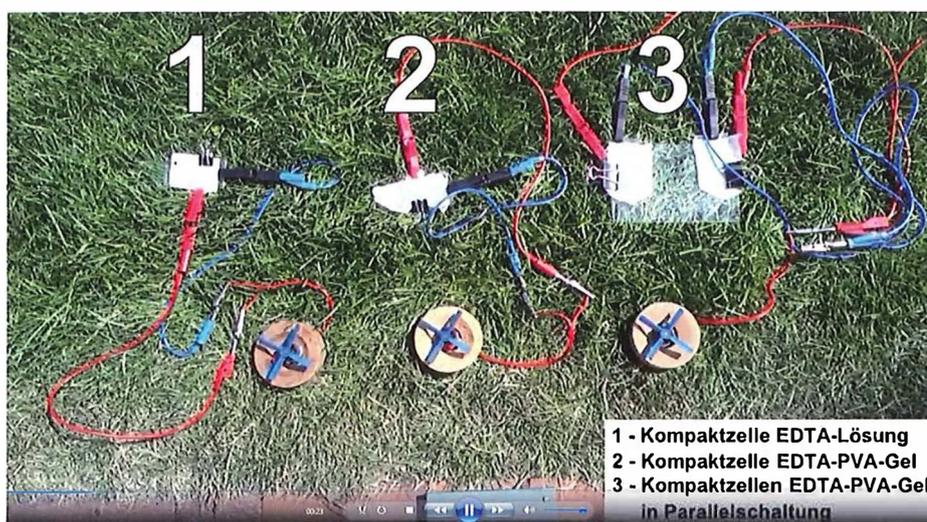


Abb. 4: Verschiedene Kompaktzellen treiben bei Sonnenbestrahlung Elektromotoren an [9].



Abb. 5: Auftragen der Titandioxid-Suspension für das Spincoating

als deutlich langlebiger heraus als SAP-EDTA-Zellen. Außerdem misst man höhere Werte für den Photostrom.

Ergänzung: Zum Vergleich der Zellen werden eine Kompaktzelle mit wässriger Elektrolyt-Lösung, eine PVA-Gel-Zelle und zwei parallel geschaltete PVA-Gel-Zellen im Sonnenlicht bestrahlt und mit Elektromotoren verbunden (vgl. Abb. 4)

Ergebnis: Vergleicht man die PVA-EDTA-Zelle mit einer Kompaktzelle mit wässriger Elektrolyt-Lösung, zeigt sich, dass zwar beide bei Sonnenbestrahlung in der Lage sind, den Motor zu betreiben, jedoch trocknet die Zelle mit der wässrigen Lösung bereits durch die Sonnenbestrahlung und hohe Umgebungswärme bald aus und kann den Motor nicht mehr antreiben. Die parallel geschalteten Zellen betreiben den Motor unter gleichen Bedingungen während des gesamten Messzeitraums (vgl. Video unter [8]).

4 Transparente und transluzide Solarzellen mit XXS-Titandioxid

Mit sinkender Teilchengröße der Titandioxid-Partikel nimmt die Transparenz von Titandioxid-beschichtetem Glas zu, was für den Anwendungsbereich BIPV relevant ist. Für die oben genannten und in bisherigen Publikationen beschriebenen photogalvanischen Zellen wurde bislang immer Titandioxid des Typs Hombikat UV 100 verwendet, das bei der Herstellung der Photoelektroden Agglomerate bildet,

was zu undurchsichtigen weißen Schichten führt. Für transluzide bzw. transparente Photoelektroden rückt eine weitere Titandioxid-Sorte in den Blick. Bei Titandioxid Hombikat XXS 100 (Fa. Sachtleben) handelt es sich um Titandioxid, ebenfalls in der Anatas-Modifikation, das hochdispers in einem Sol vorliegt, welches durch verdünnte Salpetersäure stabilisiert ist [10]. Hombikat XXS 100 kann für die Herstellung dünner Titandioxid-Schichten auf Glas, Metallen, Keramik oder mineralischen Oberflächen genutzt werden. Entsprechend beschichtete Oberflächen können super-hydrophil sein und selbstreinigend wirken.

Der Vorteil der Verwendung dieser Suspension für Photoelektroden liegt in der ausbleibenden Agglomeratbildung, wodurch transluzide oder transparente Titandioxid-Photoelektroden hergestellt werden können. Da die Titandioxid-Partikel suspendiert vorliegen, können die Nanopartikel zudem nicht eingeatmet werden und sind nicht lungengängig, was eine sicherere Handhabung bei der Herstellung der Photoelektroden gewährleistet.

Für die Herstellung der Photoelektroden bieten sich verschiedene Verfahren an. Einerseits kann die Suspension durch Rakeln auf das leitfähige Glas aufgetragen werden, was zu transluziden, aber nicht einheitlich dicken Schichten führt, die beim Sintern platzen, wie aus den Mikroskop-Aufnahmen ersichtlich wird (Abb. 6a). Das Auftragen einer zweiten Schicht und erneutes Sintern führt zu deutlich stabileren Schichten, die nun sogar kratzfest sind, wie F. Posala im Rahmen seiner Bachelor-Thesis herausgefunden hat [11]. Dies ist insbesondere für den mehrfachen Gebrauch der Photoelektroden interessant, da derartig hergestellte Photoelektroden gelagert und wieder eingesetzt werden können.

Ein anderes Verfahren, mit dem die Suspension aufgetragen werden kann, ist das Spincoating. Bei diesem Verfah-

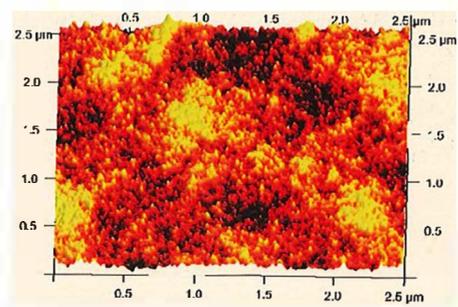


Abb. 7: Rasterkraftmikroskop-Höhenmessung der durch Spincoating erhaltenen transparenten Photoelektrode mit Titandioxid (Hombikat XXS 100). Die Spitzen an der Oberfläche sind in der Falschfarbengrafik gelb, die „Täler“ schwarz.

ren wird die aufzubringende Substanz gelöst auf einen Träger aufgetragen und durch schnelle Rotation auf dem Träger verteilt, wobei das Lösemittel verdampft und eine gleichmäßige Beschichtung erzielt wird. Dazu fixiert man die leitfähige, idealerweise quadratische Glasplatte mit doppelseitigem Klebeband auf einem Winkelschleifer o. ä. [12] und gibt 3 Tropfen Titandioxid Hombikat XXS 100 auf die Mitte der Platte (Abb. 5).

Durch Anschalten des Winkelschleifers auf niedrigster Stufe (3000 Umdrehungen pro Sekunde) für 10 Sekunden erzeugt man homogene Titandioxid-Schichten (Abb. 6b), die transparent sind.

Die durch Spincoating aufgebrachtene Schichten wurden außer mit einem digitalen Mikroskop (Keyence VHX-1000D) auch per Rasterkraftmikroskop-Aufnahmen untersucht (Abb. 7). Das Titandioxid liegt homogen über die gesamte Fläche verteilt vor, mit einer Höhendifferenz von ca. 30 nm zwischen den „Spitzen“ und den „Tälern“ auf der Oberfläche.

Weitere Untersuchungen zeigen, dass die mittlere TiO_2 -Schichtdicke ca. 240 nm beträgt.

Die Beobachtung, dass die mittels Spincoating beschichtete Photoelektrode transparent ist, führt zur Modifikation des Zellaufbaus. Wurden bei bisherigen

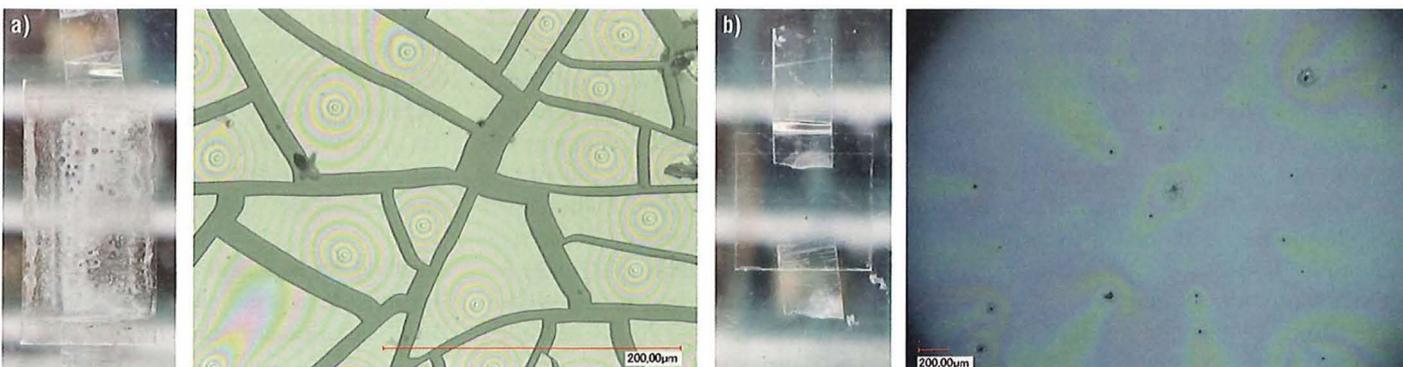


Abb. 6: Aussehen der gesinterten Titandioxid-Photoelektroden (Hombikat XXS 100) und Mikroskop-Aufnahmen a) nach Rakeln und b) nach Spincoating.



Abb. 8: Die Solarzelle aus Versuch 3 ist transparent (links) und photosensibel (rechts Spannungsmessung).

Zellen als Abstandhalter Filterpapier oder Mullbinde, sowie als Gegenelektrode Rasierscherfolien verwendet, sind für transparente Solarzellen Veränderungen hinsichtlich dieser Bauteile nötig.

Zum Vermeiden eines Kurzschlusses wird als Abstandhalter Klebegummi als flacher Rahmen auf die Photoelektrode gelegt. Als Ersatz für die Rasierscherfolien dient nun ein weiteres, unbeschichtetes Stück leitfähigen Glases. Zusammengesetzt erhält man so tatsächlich eine transparente Solarzelle, durch die man störungsfrei hindurch sehen kann (vgl. Abb. 8).

Versuch 3: Transparente Solarzelle mit Titandioxid Hombikat XXS 100

Materialien: durch 10 Sekunden langes Spincoating beschichtete Photoelektrode mit Hombikat XXS 100, PVA-EDTA-Gelelektrolyt aus V2, wobei hier zur PVA-Lösung anstelle des Feststoffs im gleichen Volumenanteil eine gesättigte Lösung von EDTA-Dinatriumsalz gegeben wurde, 1 Stück leitfähiges Glas, Klebegummi, Tesafilm, 2 Kabel, 2 Krokodilklemmen, Multimeter, Lichtquelle (z. B. Ultravitalux-Lampe, Firma Osram, Sonne, Diaprojektor), Elektromotor (Bezugsquelle: Lemo-Solar, Solarmotor mit Glockenanker, ca. 20 €).

Die Herstellung der transparenten Photoelektrode erfolgt nach [8].

Durchführung: Man formt das Klebegummi zu einer dünnen Rolle mit ca. 1–2 mm Durchmesser und bildet damit einen Rahmen auf der Titandioxid-Schicht. In den Rahmen gibt man PVA-EDTA-Gelelektrolyt, deckt mit einem Plättchen leitfähigen Glases ab (die leitfähige Seite kontaktiert den Gelelektrolyt) und drückt die Zelle vorsichtig zusammen. Mit Tesafilm kann die Zelle fixiert werden.

Durch Bestrahlen und Abdunkeln ermittelt man, ob die Zelle photosensibel ist. Man misst die Photospannung und den Photostrom und versucht nach Aufbau einer maximalen Spannung einen kleinen Motor anzutreiben.

Ergebnis: Bei Bestrahlung der Zelle mit einer Ultravitalux-Lampe misst man eine Photospannung um $U = 800$ mV und einen

Photostrom um $I = 0,8$ mA. Die Zelle ist photosensibel. Die Stromstärke ist zu gering, um einen Elektromotor anzutreiben.

Nach einiger Betriebsdauer kommt es zur Bildung eines farblosen Gases im äußeren Bereich der Zelle, wodurch die Funktionalität der Solarzelle nicht beeinträchtigt wird. Führt man eine Spritze, die eine kleine Menge Kalkwasser enthält, in den Gasraum und entnimmt etwas Gas, so zeigt sich beim Schütteln der Spritze eine deutlich Trübung des Kalkwassers. Dies legt die Vermutung nahe, dass es sich bei dem Gas um Kohlenstoffdioxid handelt, das durch Decarboxylierung von EDTA entsteht.

5 Zusammenfassung und Fazit

Ausgehend von Kompaktzellen mit Titandioxid und einer wässrigen Elektrolyt-Lösung wurden Superabsorber und Polyvinylalkohol als gelbildende Zusätze getestet, was zu einer längeren Einsetzbarkeit der Selbstbauzelle im Chemieunterricht führt. Weiterhin wurde eine Suspension von nanoskaligem Titandioxid, Hombikat XXS 100 durch Rakeln und Spincoating auf leitfähiges Glas aufgetragen, was zu transluziden und sogar transparenten Photoelektroden führt.

Schließlich ist es durch die Modifikation des Titandioxids, der Gegenelektrode und des Abstandhalters erstmalig gelungen, mit einfachen Mitteln eine transparente Solarzelle für den Schulunterricht herzustellen. Diese ist aber noch nicht leistungsstark genug, um einen Motor anzutreiben. Insbesondere hinsichtlich höherer Stromstärken besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Dennoch ist so ein entscheidender Schritt hinsichtlich des Anwendungsgebiets der gebäudeintegrierten Photovoltaik gelungen, ein Thema, das für die heutigen Schülerinnen und Schüler angesichts der zunehmenden Deckung unseres Energiebedarfs durch regenerative Energiequellen von großer Bedeutung sein wird. Videos bzw. Fotostrecken zur Herstellung der Photoelektroden bzw. der Titandioxid-Zellen sind unter [8] kostenlos zugänglich. ■

Dank

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG wird für die Förderung des Forschungsvorhabens Photo-LeNa (Photoprozesse in der Lehre der Naturwissenschaften) gedankt. Herrn Dr. Bernd Rohe wird für die Bereitstellung von Hombikat XXS 100 gedankt.

Literatur

- [1] a) G. P. Smestad, M. Grätzel: „Demonstrating electron transfer and nanotechnology: A natural dye-sensitized nanocrystalline energy converter“, *Journal of Chemical Education*, 75 (6), 752 (1998).
b) B. O'Regan, M. Grätzel: „A low-cost, high efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films“, *Nature*, 353, 737 (1991).
- [2] Report unter http://nanomarkets.net/market_reports/report/bipv_glass_markets_2012, Zugriff: 16.6.2014
- [3] C. Bohrmann, M. Twellmann, M. W. Tausch: „Vom galvanischen Element zur Solarzelle – Lichtgetriebene elektrochemische Prozesse im Chemieunterricht“, *NiU Chemie*, 66 (12), 12 (2001).
- [4] C. Bohrmann, M. W. Tausch: „Photogalvanic Cells for Classroom Investigations – A Contribution for the Ongoing Curriculum Modernization“, *J. Chem. Educ.*, 80 (12), 1471 (2003).
- [5] C. Bohrmann-Linde, S. Krees, M. W. Tausch, M. von Wachtendonk: *CHEMIE 2000+, Qualifikationsphase*, C. C. Buchner, Bamberg 2014.
- [6] C. Bohrmann-Linde, S. Krees, I. Reisewitz-Swertz, N. Meuter: „Auf den Spuren der Photovoltaik – Kompaktzellen mit Rasierscherfolien.“ *PdN – ChiS*, 58 (4), 46 (2009).
- [7] C. Grubberg, A. Kühler-Krützfeld: „Von einfach bis anspruchsvoll – Unterrichtsbeispiele zu den Themen Superabsorber, Molvolumen und Reaktionskinetik“, *NiU-Chemie*, 81, 28 (2004).
- [8] www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/chemie2000/experiments/titandioxid/index.html; Zugriff: 20.11.2014
- [9] S. Ruckebier: „Photogalvanische Kompaktzelle mit Gelelektrolyt“, Bachelor-Thesis im Fachbereich Chemie und ihre Didaktik, Universität Wuppertal, Oktober 2013.
- [10] http://www.sachtleben.de/fileadmin/pdf/dateien/titandioxid/HOMBIKAT_XXS_100.pdf; Zugriff: 16.6.2014
- [11] F. Posala: „Solarzellen mit Nano- TiO_2 -Suspensionen“, Bachelor-Thesis im Fachbereich Chemie und ihre Didaktik, Universität Wuppertal, November 2013.
- [12] A. Banerji, M. W. Tausch, U. Scherf: „Fantastic Plastic – von der Cola-Flasche zur organischen Leuchtdiode“, *CHEMKON*, 19 (1), 7 (2012).

Anschrift der Verfasser

Dr. Claudia Bohrmann-Linde, Sebastian Spinnen, Patric Sahling, Bergische Universität Wuppertal, FB C – L13.02/04, Gaußstr. 20, 42119 Wuppertal, E-Mail: bohrmann@uni-wuppertal.de