

## Bau einfacher Solarzellen

Bärbel Fromme

Institut für Angewandte Physik, Lehrerbildung, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf,  
Universitätsstr. 1, 40225 Düsseldorf

### Kurzfassung

Mit Hilfe zum Teil alltäglicher Materialien wie Hibiskustee, Fruchtsaft und Jodlösung lassen sich einfache, aber funktionstüchtige Solarzellen (Grätzelzellen) bauen, mit denen auf vielfältige Weise experimentiert werden kann. Wir setzten den Solarzellenbau insbesondere bei Projekten mit Schülerinnen und Schülern der Jahrgangsstufen 5-13 ein, aber auch in der Aus- und Fortbildung von Physiklehrerinnen und -lehrern.

### 1. Einführung

Bei vielen unserer Projekte für Schülerinnen und Schüler an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, wie zum Beispiel „Physik für Schülerinnen“ und „Physik für Schüler“ [1], steht das eigene Experimentieren, also das „Selbermachen“ im Vordergrund. Als besonders geeignet und beliebt in diesen Projekten hat sich der Bau von Grätzel-Solarzellen erwiesen: hier werden nicht nur Experimente durchgeführt, sondern das Experimentiergerät wird in weiten Teilen auch selbst hergestellt. Es werden dazu (unter anderem) alltägliche Stoffe verwendet und das Thema ist im Rahmen der Diskussion um erneuerbare Energiequellen hochaktuell. „Ganz nebenbei“ können Grundlagen der Elektrizitätslehre, wie zum Beispiel der Stromstärke- und Spannungsbegriff, eingeführt bzw. wiederholt werden. Elementare Messtechnik - wie der Umgang mit Multimetern - wird erlernt und eingeübt.

### 2. Aufbau und Grundprinzip der Grätzelzelle

Kernstück der Grätzelzelle [2, 3, 4] ist eine Schicht aus  $\text{TiO}_2$ , die mit einem Farbstoff angefärbt wurde. Am Farbstoff - geeignet sind hier u. a. zum Beispiel Rutheniumbipyridin oder auch die natürlichen Farbstoffe in Hibiskustee und roten Beeren - werden durch Einstrahlung von Licht Elektron-Loch-Paare erzeugt (Abb. 1). Die angeregten Elektronen gelangen in das Leitungsband des  $\text{TiO}_2$  und werden von dort an eine Leitglaselektrode abgegeben. Von einer Gegenelektrode (ebenfalls Leitglas) werden Elektronen mit Hilfe eines Elektrolyten - in unserem Fall einer Jodlösung - zu den an den Farbstoffmolekülen verbliebenen Löchern transportiert. Dabei findet ein Jodid/Trijodid-Zyklus statt (Abb. 2): Am Farbstoff können sich 3  $\text{I}^-$ -Ionen unter Abgabe zweier Elektronen an die Farbstofflöcher zu einem  $\text{I}_3^-$ -Molekül verbinden. An der Gegenelektrode wird das Molekül unter Aufnahme zweier Elektronen wieder in 3  $\text{I}^-$ -Ionen zerlegt. Als Resultat erhält man eine Spannung zwischen den beiden Elektroden. Voraussetzung für den Ablauf des Jodid/Trijodid-Prozesses

und damit für die Entstehung der Spannung ist die Beschichtung der Gegenelektrode mit einem Katalysator. Dieses kann Platin sein, aber auch Graphit ist geeignet [2].

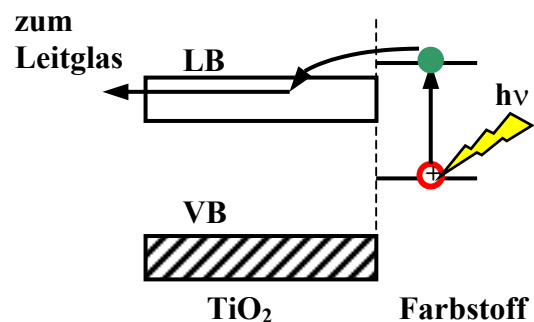


Abb. 1: Anregung eines Farbstoffmoleküls unter Lichteinfall und Abgabe des Elektrons über die Titandioxidschicht an die Leitglaselektrode

Für einen hohen Wirkungsgrad der Solarzellen muss die Titandioxid-Schicht aus Nanopartikeln (10 - 20 nm) bestehen. Die vom Farbstoff benetzte  $\text{TiO}_2$ -Oberfläche ist dann porös und sehr groß, so dass viele Farbstoffmoleküle angeregt und auch viele Elektronen an das Titandioxid abgegeben werden können.  $\text{TiO}_2$ -Schichtdicken von ca. 7 - 10  $\mu\text{m}$  haben sich als gut erwiesen [2, 3, 4]. Bei größerer Schichtdicke ist das Titandioxid u. U. nicht ausreichend transparent: das eingestrahelte Licht wird in der Schicht zu stark gestreut und der Farbstoff nicht optimal beleuchtet.

Die Quantenausbeute ist bei der Grätzelzelle sehr hoch (>80%), der Wirkungsgrad liegt jedoch nur in der Größenordnung von etwa 10% [2, 3, 4].

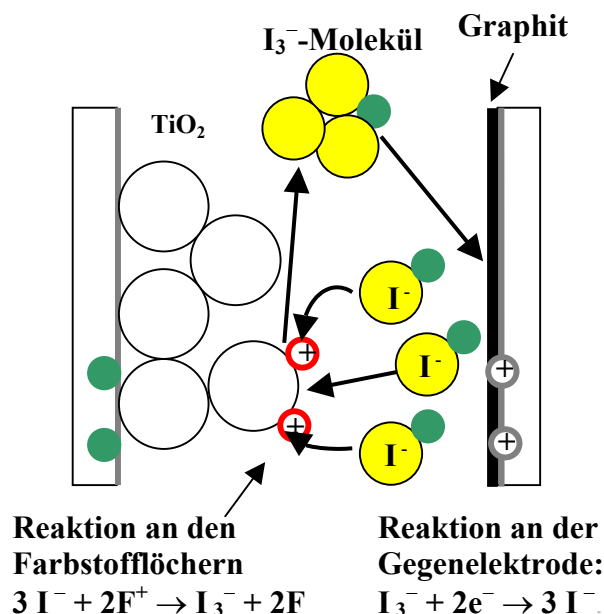


Abb. 2: Jodid/Trijodid-Zyklus. Zwischen den beiden Leitgaselektroden entsteht unter Lichteinfall eine Spannung

### 3. Bau der Solarzellen

Das Material zum Bau der Solarzellen kann komplett von einem Anbieter bezogen werden [5]. Es kann jedoch mit einigem Mehraufwand auch einzeln beschafft werden (Bezugsquellen siehe [6]). Die Leitglasplatten können bereits fertig mit  $\text{TiO}_2$  beschichtet gekauft werden [5] - man kann die Beschichtung aber auch selbst vornehmen, was aber eine mehrminütige Sinterung (Ofen, Bunsen- oder Spiritusbrenner, Heißluftgebläse) bei 400 - 500 °C erfordert [2, 5, 6].

Arbeitsschritte:

1. Die  $\text{TiO}_2$ -beschichtete Platte wird für mindestens 5 Minuten in Hibiskustee gelegt (Abb. 3). Die Titandioxidschicht ist anschließend deutlich lila gefärbt.

2. Während der Anfärbezeit wird die Gegenelektrode präpariert: die leitende Seite der Glasplatte wird mit Wasser und Putzpapier gereinigt. Anschließend wird Graphit aufgebracht, indem die Elektrode mit einem weichen Bleistift bemalt wird.

3. Bei der eingefärbten Elektrode wird überflüssiger Farbstoff unter fließendem Wasser abgespült. Dieser Arbeitsschritt ist sehr wichtig, da die Solarzelle sonst nicht optimal funktioniert. Anschließend wird die Platte mit einem Föhn getrocknet.

4. Die beiden Glasplatten werden aufeinander gelegt (Titandioxidschicht auf Graphit). Dabei werden sie etwas gegeneinander verschoben, so dass die später entstehende Spannung auch abgegriffen werden

kann (Abb. 4). Sie werden mit transparentem Klebefilm fixiert. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Platten anschließend nicht verschieben lassen. Außerdem sollte möglichst nur eine Lage Klebefilm verwendet werden, damit eine hohe Transparenz gewährleistet ist.

5. Von den Seiten lässt man Jodlösung zwischen die Glasplatten laufen (Abb. 5). Misst man gleichzeitig die Kurzschlussstromstärke, kann man schon bei normaler Raumbeleuchtung beobachten, wie diese mit wachsender Benetzung der Zelle mit der Jodlösung ansteigt. Die Zelle beginnt zu arbeiten.

Für den Solarzellenbau wurde ein Arbeitsblatt erstellt, in dem alle Arbeitsschritte dargestellt sind [7]. Schülerinnen und Schüler bzw. Studierende können damit problemlos weitgehend selbständig arbeiten.



Abb. 3: Anfärben der  $\text{TiO}_2$ -beschichteten Elektrode mit Hibiskustee

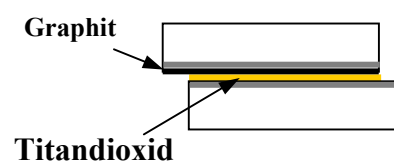


Abb. 4: Zusammenbau der mit Graphit und Titandioxid beschichteten Leitgaselektroden

Typische Werte der Solarzellen:

Mit normalen Reuterlampen (6V/5A) beleuchtet (Abb. 6), liefern gut präparierte Solarzellen (aktive Fläche ca. 6  $\text{cm}^2$ ) unbelastet eine Spannung von  $\approx 0,4 \text{ V}$ . Die maximale Kurzschlussstromstärke beträgt 1-2 mA, wenn die Lampe so dicht wie mög-

lich an die Titandioxid-Elektrode herangebracht wird. Die maximalen Stromstärkewerte werden erst nach einigen Minuten erreicht.



Abb. 5: Zwischen die Elektroden lässt man Jodlösung laufen: die Solarzelle beginnt zu arbeiten



Abb. 6: Experimente mit Reuterlampen

Erfahrungen:

Zum Anfärben ist Hibiskustee hervorragend geeignet. Hibiskusblüten sind einfach - zum Beispiel im Teeladen - zu beschaffen und in getrocknetem Zustand praktisch unbegrenzt haltbar. Saft von pürierten roten Beeren (wie Himbeeren oder Brombeeren) kann auch benutzt werden. Fertige Fruchtsäfte aus dem Supermarkt sind weniger geeignet, da der Fruchtsaftgehalt hier nur bei etwa 50% liegt. Die Solarzellen liefern damit wesentlich niedrigere Stromstärkewerte.

Geeignete Jodlösung kann fertig bezogen werden [5] oder aus Kaliumjodid und Jod selbst hergestellt werden [2, 6]. Jodlösung zur Desinfektion aus der Apotheke hat sich als nicht geeignet erwiesen - die Solarzellen funktionieren damit nur unbefriedigend.

Die fertigen Solarzellen sind benutzbar bis die Jodlösung eingetrocknet ist (i. a. einige Tage). Anschließend lassen sie sich mit Hilfe neuer Jodlösung reaktivieren. Die erzielten Stromstärkewerte sind dann aber schlechter.

Die Leitglasplatten können immer wieder benutzt werden. Die  $\text{TiO}_2$ -Schicht kann einfach abgewischt und eine neue aufgetragen werden.

#### 4. Experimente mit den Solarzellen

Mit den fertigen Solarzellen lassen sich eine Fülle von Experimenten durchführen. Schülerinnen und Schüler messen bei uns zum Beispiel Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke in Abhängigkeit von der aktiven Solarzellenfläche und der Lichtintensität. Hiermit soll verstanden werden, warum Solaranlagen häufig große Flächen (zum Beispiel auf Dächern) einnehmen und warum eine intensive Sonneneinstrahlung günstig ist. Die aktive Fläche der Solarzelle wird durch Abdecken variiert, die Lichtintensität mit Hilfe einer wachsenden Zahl gleichartiger Graufilter. Geeignete Graufilter lassen sich einfach herstellen, indem man graue Flächen auf Transparentfolie druckt, die anschließend als Dia gerahmt werden. Mit Studierenden und älteren Schülerinnen und Schülern können auch Strom-Spannungskennlinien bei Belastung der Solarzelle aufgenommen werden (siehe auch [2]).

Ein Highlight bei den Experimenten ist der Betrieb kleinerer Geräte mit den Solarzellen, wobei die Auswahl auf Grund der relativ geringen Stromstärke begrenzt ist. Schaltet man jedoch 4 Solarzellen in Reihe, können Taschenrechner mit LCD-Anzeige oder Soundchips aus Glückwunschkarten betrieben werden [5]. Zur Beleuchtung hervorragend geeignet ist dafür ein Overhead-Projektor, auf den die Solarzellen gelegt werden (Abb. 7). Mit 6 Solarzellen können rote Leuchtdioden mit einem Strombedarf im mA-Bereich betrieben werden. Beim Betrieb mit den Solarzellen emittieren diese aber auf Grund der sehr geringen zur Verfügung stehenden Stromstärke nur sehr schwach.



Abb. 7: Reihenschaltung von Solarzellen auf dem Overhead-Projektor

## 5. Solarzellenbau in Schülerprojekten und Lehrerbildung

Solarzellenbau wird bei uns für Schülerinnen und Schüler der Jahrgangsstufen 5-10 im Rahmen der Projekte „Physik für Schülerinnen“ und „Physik für Schüler“ [1] angeboten. Schülerinnen und Schüler der Jahrgangsstufen 12/13 bauen Solarzellen während eines Praktikums im Rahmen des „Schnupperstudiums“. Außerdem wird der Solarzellenbau bei uns auch von einzelnen Schülern im Rahmen einer Facharbeit, während eines berufsorientierenden Praktikums und in Projektpraktika (in den Schulferien) durchgeführt.

In der Lehrerbildung werden Solarzellen im Kurs „Elektrizität“ (Zusatzbildung für Sek. I) in Zusammenhang mit der Einführung verschiedener Spannungsquellen gebaut; im Praktikum „Schulorientiertes Experimentieren“ (für Sekundarstufe II) ist Solarzellenbau ein Bestandteil der Versuchseinheit „Moderne Energiequellen“, bei der auch mit Siliziumsolarzellen und Brennstoffzellen experimentiert wird. Auch im Rahmen einer Lehrerfortbildung wurden bei uns schon Solarzellen gebaut.

Bei den Schülerinnen und Schülern der Jahrgangsstufen 5-10 ist der Solarzellenbau Teil einer halbtägigen Experimentiereinheit zum Thema Elektrizität. Vor dem eigentlichen Bau der Solarzellen werden die Grundbegriffe der Elektrizitätslehre noch einmal wiederholt bzw. eingeführt. Dabei werden einfache Schaltkreise aufgebaut, Leiter und Isolatoren unterschieden und die Handhabung von Messgeräten eingeübt. Die erworbenen Kenntnisse und Fähigkeiten werden dann beim Solarzellenbau vertieft: hier ist zum Beispiel herauszufinden, welche Seite der Gegenelektrode die leitende ist. Jüngere Schülerinnen und Schüler benutzen dazu die Leitglasplatte als Teil eines Stromkreises mit Glühlampe und Batterie. Ältere Schüler werden dazu aufgefordert, die Widerstände der beiden Seiten der Glasplatte mit einem Multimeter zu bestimmen. An den fertigen Solarzellen werden dann zahlreiche Stromstärke- und Spannungsmessungen durchgeführt (s. o.). Die Gesetze der Reihenschaltung werden spielerisch erlernt bzw. wiederholt.

Bei den Schülerinnen und Schülern der Jahrgangsstufen 12/13 verbinden wir den Solarzellenbau mit einer kleinen Einführung in die Halbleiterphysik am Beispiel der Siliziumsolarzelle. Die Grundkenntnisse der Elektrizitätslehre setzen wir voraus. Es zeigt sich jedoch immer wieder, dass die wenigsten Schülerinnen und Schüler mit einem Multimeter umgehen können.

Die Schülerinnen und Schüler sind i. a. hoch motiviert, denn Solarzellen sind ein aktuelles Thema in der Energiediskussion und mittlerweile ein vertrauter Anblick aus der Umgebung. Hier können sie nun selbst hergestellt und auch mit nach Hause genommen werden (ein nicht zu unterschätzender Aspekt). Es werden zum großen Teil aus dem Alltag vertraute Materialien verwendet: Hibiskustee und Bleistift

kennen alle und der Hinweis darauf, dass auch alle  $\text{TiO}_2$  benutzen, da es als weißes Farbpigment u. a. in Zahnpasta und Sonnenschutzmitteln Verwendung findet, löst häufig Erstaunen und zusätzliches Interesse hervor.

## 6. Zusammenfassung

Aus  $\text{TiO}_2$ - und graphitbeschichteten Leitglasplatten, Jodlösung und Hibiskustee lassen sich einfach funktionstüchtige Solarzellen (Grätzelzellen) herstellen. Der Bau dieser Solarzellen hat sich an der Heinrich-Heine-Universität in häufigem Einsatz bei Projekten mit Schülerinnen und Schülern und auch in der Aus- und Fortbildung der Physiklehrerinnen und -lehrer bewährt.

Die Solarzellen lassen sich auch von jüngeren Schülerinnen und Schülern problemlos herstellen - Misserfolge kamen bisher nicht vor. Mit den Solarzellen als selbstgebaute Spannungsquellen kann vielfältig experimentiert werden. Kenntnisse der Elektrizitätslehre werden dabei spielerisch wiederholt oder auch neu erlernt.

## 7. Literatur

- [1] Bärbel Fromme und Hildegard Hammer, Didaktik der Physik, Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG, Leipzig 2002, ISBN 3-936427-11-9
- [2] Greg P. Smestad and Michael Grätzel, J. Chem. Education 75, 752 (1998)
- [3] Andreas Kay and Michael Grätzel, J. Phys. Chem. 97, 6272 (1993)
- [4] Brian O'Regan and Michael Grätzel, Nature 23, 737 (1991)
- [5] Man Solar, Postfach 1, NL-1755 ZG Petten <http://www.mansolar.com/deutsch.htm> (Stand: 13.2.2004)
- [6] Claudia Bohrmann, Michael Twellmann und Michael W. Tausch, NiU-Chemie 66, 12 (2001)
- [7] Arbeitsblätter können bei mir angefordert werden: [fromme@uni-duesseldorf.de](mailto:fromme@uni-duesseldorf.de)