

Organische Photovoltaik

Eigenbau-Plastiksolarzelle mit interaktiver Flash-Lernanimation

M. Zepp und M. W. Tausch

Ein neues Experiment zum Bau einer Easy-OPV-Zelle kann schnell und sicher durchgeführt werden. Dazu wurde auch eine interaktive Flash-Animation entwickelt, die mehrsprachig und kostenlos im Netz zur Verfügung steht.

Stichwörter: Konjugierte Polymere, organische Photovoltaik, Eigenbau-OPV-Zelle, Flash-Animation

1 Einleitung

Die jährliche solare Einstrahlung auf die Erdoberfläche übersteigt statistisch gesehen den Weltprimärenergieverbrauch um das 15 000-fache [1] und wird daher im 21. Jahrhundert einen wachsenden Anteil im globalen Energiemix einnehmen (vgl. S. XX in diesem Heft). Die organische Photovoltaik (OPV) ist eine Zukunftstechnologie mit hohem Potenzial. Sie basiert auf halbleitenden organischen Materialien, z. B. Fullerenen, konjugierte Polymere und Oligomere. Diese Materialien überzeugen anwendungstechnisch in vielerlei Hinsicht. Ihre Produktionskosten sind vergleichsweise niedrig und sie können aus Lösung verarbeitet werden. Dank ihrer hohen Absorptionseigenschaften reichen sehr dünne Schichten aus, was zu einem geringen Gewicht führt und die Möglichkeit eröffnet flexible und sogar transluzente Module zu produzieren (vgl. dazu www.heliatek.com). Die photoaktive Schicht organischer Solarzellen, eingebettet zwischen einer transparenten Anode und einer metallischen Kathode, be-

steht in der Regel aus zwei verschiedenen Komponenten, einem Elektronen-Donor (p-Halbleiter), der für die Lichtabsorption verantwortlich ist und einem Elektronen-Akzeptor (n-Halbleiter). Die Strukturen zweier bekannter, intensiv erforschter Vertreter dieser Materialien sind in Abbildung 1 angegeben. Das konjugierte Polymer Poly(3-hexylthiophen) (P3HT) dient als Donor-Komponente, das Fullerenderivat [6,6]-Phenyl-C₆₁-Butansäuremethylester (PCBM) stellt die Akzeptor-Komponente dar. Die grundlegende Funktion der Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie beruht auf einem photoinduzierten Elektronentransfer vom Donor zum Akzeptor [2] (Abb.2). Die Forschung im Bereich organischer Solarzellen ist hochaktuell. Unterschiedliche Wissenschaftszweige (Synthesechemie, Materialwissenschaft, Physik, Oberflächenchemie, Elektrotechnik) arbeiten daran, neue und bessere Materialien, Bauelemente und Methoden zu entwickeln, um die organische Photovoltaik kommerziell nutzbar zu machen (vgl. auch Beitrag von U. Scherf in diesem Heft). Auch aus fachdidaktischer Sicht bietet die OPV großes Potential. Als innovatives Thema verknüpft es anwendungsbezogen ver-

schiedene Inhaltsbereiche und Basis-konzepte des Chemieunterrichts (Struktur – Eigenschaft, Donator – Akzeptor, Grundzustand – elektronisch angeregter Zustand). Um die organische Photovoltaik für die Chemielehre zugänglich zu machen wurde ein Experiment entwickelt, das es ermöglicht mit einfachen Materialien und Arbeitsschritten ein Solar-modul zu fertigen. Basierend auf diesem und ähnlichen Experimenten wurde eine interaktive Flash-Lernanimation erstellt, in der Vorgänge in einer organischen Solarzelle modellhaft in didaktischer Reduktion visualisiert werden.

2 Versuch – Bau einer Easy-OPV-Zelle mit drei photoaktiven Flächen

Der im Folgenden beschriebene Versuch ist neu. Er stellt eine weitere Version der von A. Banerji [3] und D. Scherr [4] beschriebenen Funktionseinheiten mit leitenden Polymeren dar. Ein großer Vorteil dieser Easy-Variante liegt darin, dass durch den Verzicht auf das Abkleben der photoaktiven Schicht mit einer Klebebandmaske der kritische Vorgang des Einspritzens der Galinstan-Kathode entfällt und somit keine Gefahr mehr besteht, die organische Schicht mit einer Injekti-

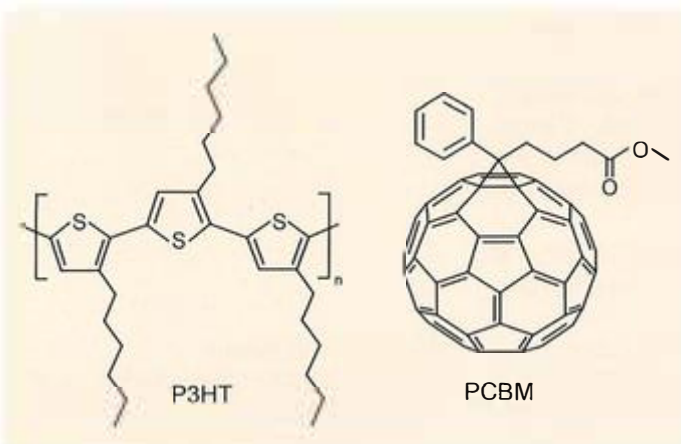


Abb. 1: Repetiereinheit des Elektronen-Donors Poly(3-hexylthiophen) (P3HT) und Gerüstformel des Elektronen-Akzeptors [6,6]-Phenyl-C₆₁-Butansäuremethylester (PCBM)

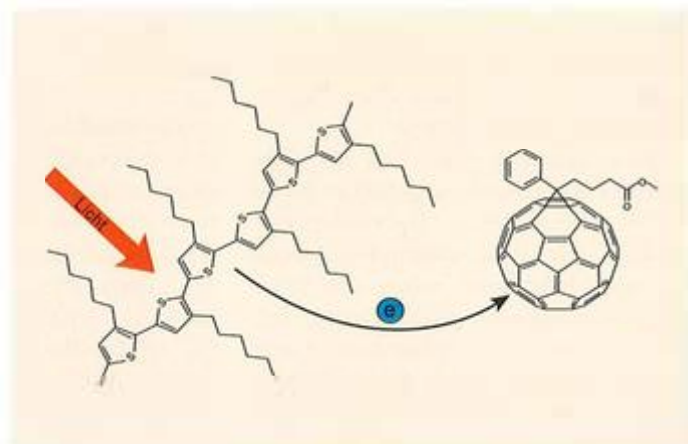


Abb. 2: Schema zum photoinduzierten Elektronentransfer vom Donor zum Akzeptor

onsnadel zu beschädigen. In Abbildung 3 wird der Aufbau der Zelle schematisch beschrieben.

Geräte und Chemikalien: low-cost-Spincoater, Multimeter mit 2 Anschlusskabeln, 2 Krokodilklemmen, Tesafilm, Schere, Heizplatte, Kosmetiktücher, Objektträger (ca. 3,5 cm x 3,5 cm), doppelseitiges Klebeband, Fahrradschlauch, selbstklebende Kupferfolie, FTO-Glas (3,5 x 3,5 cm), Galinstan, Poly-3,4-ethylenedioxy-thiophen:Polystyrolsulfonat (PEDOT:PSS) in H₂O, Poly(3-hexylthiophen) (P3HT), [6,6]-Phenyl-C₆₁-Butansäure-methylester (PCBM), Chlorbenzol (Xn, N), Aceton (F, Xi), 2 Foldback-Klammern

1) Vorbereitungen am Vortag: Die Lösung der photoaktiven Komponenten muss am Vortag hergestellt werden, da diese mindestens 12 Stunden rühren sollte. Zur Herstellung der Lösung werden 20 mg P3HT und 20 mg PCBM abgewogen und mit 2 mL Chlorbenzol versetzt (die Menge ist ausreichend für ca. 10 Solarzellen bei der Verwendung der FTO-Gläser in der angegebenen Größe). Man lässt die Lösung am besten über Nacht in einem geschlossenen Schraubdeckelglaschen bei Raumtemperatur rühren.

2) Vorbereitung des FTO-Glases: Das FTO-Glas wird zunächst mit Wasser abgespült und getrocknet, um Staubreste zu entfernen. Anschließend werden beide Flächen mit einem in Aceton getränkten Kosmetiktuch abgerieben. Mit einem Tesafilm-Streifen wird ca. 1/3 der leitfähigen Fläche abgeklebt.

3) Beschichtung des FTO-Glases mit dem leitfähigen Polymer PEDOT:PSS (Abzug!): Mit Hilfe eines Streifens doppelseitigen Klebebandes wird das FTO-Glas mit der leitfähigen Schicht nach oben auf dem Drehteller des Spincoaters fixiert. Man tropft ca. 0,1 mL der PEDOT:PSS-Lösung in die Mitte des Glassubstrats und spincoatet bei ca. 3000 U/Min für 30 s. Anschließend wird der Tesafilm-Streifen entfernt und das beschichtete Substrat auf einer Heizplatte bei 140°C für 5 Min ausgeheizt.

4) Abscheidung der photoaktiven P₃HT:PCBM-Schicht (Abzug!): Das bereits mit PEDOT:PSS beschichtete FTO-Glas wird wieder auf dem Drehteller des Spincoaters fixiert. Der blanke FTO-Bereich wird wieder mit einem Stück Tesafilm abgeklebt. Etwa 0,2 mL der P₃HT:PCBM-Lösung werden mittig auf das Substrat getropft und bei einer Geschwindigkeit von ca. 1000 U/Min für 30 s gespincoatet. Abschließend ent-

fernt man den Tesa-Streifen und temperiert das Substrat bei 140°C für 10 Min auf der Heizplatte (während der Temperprozedur kann Punkt 5 durchgeführt werden).

5) Vorbereitung der Gegenelektrode: Auf ein quadratisches Glasplättchen (halbiertes Objektträger) wird auf zwei gegenüberliegenden Seiten je ein schmales Stück Fahrradschlauch mit doppelseitigem Klebeband befestigt (als Abstandhalter). Anschließend werden drei ca. 0,3 cm breite Streifen der selbstklebenden Kupferfolie mit etwas Abstand nebeneinander auf dem Glas befestigt (siehe Abb. 3). Die Kupferstreifen dienen als Zuleitung für die eigentliche Kathode. Vorsichtig spritzt man nun auf jeden Kupferstreifen einen Galinstan-Tropfen. Diese sollten in ihrer Höhe gerade den Fahrradschlauch überragen.

6) Zusammenbau und Inbetriebnahme des Solarmoduls: Das abgekühlte FTO-Glas aus Schritt 4) wird mit der beschichteten Seite nach unten auf das Glasplättchen gelegt, sodass die photoaktive Schicht in Kontakt mit den Galinstan-Tropfen gerät. Dabei ist darauf zu achten, dass die beiden Glassubstrate etwas versetzt aufeinandergelegt werden und dass der nicht-beschichtete FTO-Bereich gegenüber den Kupferzuleitungen liegt. Das Solarmodul wird mit zwei Foldback-Klammern an den Seiten des Fahrradschlauchs fixiert. Zur Messung einer Photospannung und eines Photostroms klemmt man den Plus-Pol eines Multimeters an die FTO-Anode und den Minuspol an eine der drei Kupferzuleitungen an und hält das Solarmodul ins Sonnenlicht oder unter eine künstliche Lichtquelle mit ausreichender Intensität (z. B. eine Ultravitaluxlampe). Die hergestellte Easy-OPV-Zelle erreicht im Sonnenlicht eine Photospannung von ca. 500 mV. Der Photostrom einer einzelnen photoaktiven Fläche kann je nach Größe (abhängig von der Größe des Galinstan-Tropfens) Werte von bis zu 1 mA erreichen. Bereits damit lässt sich ein kleiner Solarmotor betreiben. Zur Erhöhung der Stromstärke können die drei Kupferzuleitungen verbunden werden.

3 Interaktive Flash-Lernanimation zur Erschließung der Elementarprozesse

Die Flash-Animation „Organische Photovoltaik – Solarzellen mit photoaktiver Schicht aus organischen Materialien“ stellt ein umfangreiches Informations-

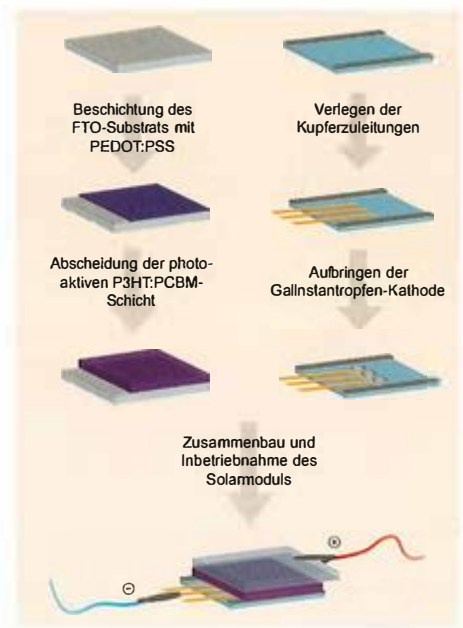


Abb. 3: Schema zum Aufbau einer Easy-OPV-Zelle. Vgl. Anleitung in [5].

angebot mit interaktiven Funktionen zur Verfügung. Ein kostenloser Zugang findet sich unter [5]. Sie gliedert sich in drei inhaltlich aufeinander aufbauende Module.

3.1 Modul 1 – Aufbau der Eigenbau-Solarzelle

Das erste Modul beinhaltet eine animierte Schritt-für-Schritt-Anleitung für den Bau einer organischen Solarzelle in der Klebebandvariante nach Banerji [5]. Der Benutzer erhält hier neben praktischen Anweisungen einen Überblick über den grundlegenden Schicht-Aufbau organischer Solarmodule und gleichzeitig Informationen zur Funktion der einzelnen Schichten. Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt aus der Flash-Animation. Es bietet sich an, dieses Modul der Flash-Animation mit dem Aufbau der Easy-OPV (vgl. Abschnitt 3 dieses Beitrags) hinsichtlich der Funktionen einzelner Schichten vergleichen zu lassen. Die beiden folgenden Module der Flash-Animation beinhalten zwei inhaltlich aufeinander aufbauende Funktionsmodelle für die Energieumwandlung.

3.2 Modul 2 – Elementarschritte der Energieumwandlung im Teilchenmodell

Im ersten Funktionsmodell werden die Elementarschritte in einer sehr vereinfachten Darstellung visualisiert (Abb. 5). In einem Querschnitt durch die photoaktive Schicht kann der Benutzer die Teilschritte Lichtabsorption und Elektronen-Loch-Paar-(Excitonen-) Bildung, Excitonen-Diffusion zur Donor/Akzeptor-Grenzfläche



Bergische Universität Wuppertal Chemie und ihre Didaktik © 2013, M. Zepp | M. Tausch

Abb. 4: Screenshot der Flash-Animation zum Aufbau der Solarzelle [5]

und Ladungstrennung unter Erzeugung eines Photostroms interaktiv ansteuern und verfolgen. Gleichzeitig werden Informationen zu diesen einzelnen Schritten in Textform zur Verfügung gestellt (siehe rechte Seite in Abb. 5). Zusätzlich zu dieser schematischen Darstellung der Elementarschritte, die zunächst mit einfachen Teilchenmodellen und ohne Strukturformeln auskommt, kann der Nutzer sich über die einzelnen Komponenten der Solarzelle, deren Struktur und Funktion, in gesonderten Informationsfeldern informieren (siehe Abb. 5 links).

3.3 Modul 3 – Elementarschritte der Energieumwandlung im Energiestufenmodell

Während im Funktionsmodell aus Modul 2 das Konzept vom Grundzustand und dem elektronisch angeregten Zustand zwar angesprochen, jedoch nicht visualisiert wird, schließt das Modul 3 dieses Konzept auch optisch ein und veranschaulicht die

mechanistischen Schritte in einem Energieschema. Die einzelnen Komponenten/Schichten der Solarzelle werden anhand ihrer Energieniveaus und deren relativer Lage zueinander dargestellt (Abb. 6). Auch hier kann der Nutzer wieder die einzelnen Teilschritte (Lichtabsorption und Bildung eines Excitons, Diffusion des Excitons zur Donator/Akzeptor-Grenzfläche, Ladungstrennung an der Donator/Akzeptor-Grenzfläche und Erzeugung eines Photostroms) ansteuern und verfolgen. Neben der graphischen Darstellung werden zu jedem einzelnen Schritt nebenstehend Informationen in Textform zur Verfügung gestellt (siehe rechte Seite in Abb. 6). Durch ein gesondertes Informationsfeld (siehe linke Seite in Abb. 6) hat der Nutzer die Möglichkeit weitere kleine Teilanimationen abzurufen, in denen Detail-Schritte dargestellt werden. Man erfährt dort wie (Elektronen-)Löcher in der Donor- bzw. Elektronen in der Akzeptor-Komponente wandern können oder was geschieht,

wenn ein Exciton nicht die Donor/Akzeptor-Grenzfläche erreicht. Daneben wird auch ein grundlegender Aspekt – die Entstehung einer Bandlücke in konjugierten Polymeren – in einer Animation erklärt. Weiterhin kann ein Vergleich zwischen organischen und anorganischen Halbleitern bezüglich der Bildung von freien Ladungsträgern in der photoaktiven Schicht in Form einer kleinen Animation abgerufen werden.

Dank
 Der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG wird für die Förderung des Forschungsvorhabens Photo-LeNa (Photoprozesse in der Lehre der Naturwissenschaften) gedankt.

Literatur

[1] D. Wöhrle, O. R. Hild, *Energie der Zukunft, Organische Solarzellen*. Chem. Unserer Zeit 44 (3), S. 174 – 189 (2010)
 [2] B. C. Thompson, J. M. J. Fréchet, *Polymer-Fulleren-Solarzellen*. Angew. Chem. 120 (1), S. 62 – 82 (2007)
 [3] A. Banerji, M. W. Tausch, U. Scherf, *Fantastic Plastic, Von der Cola-Flasche zur organischen Leuchtdiode*. Chemkon 19 (1), S. 7–12 (2012)
 [4] D. Scherr, *Plastiksolarzellen – Ein Experiment für die Schule?*. Chemkon 21 (1), S. 31–36 (2014)
 [5] www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/flash/

Anschrift der Verfasser
 Melanie Zepp*, Prof. Dr. Michael W. Tausch, Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal, mzepp@uni-wuppertal.de



Bergische Universität Wuppertal Chemie und ihre Didaktik © 2013, M. Zepp | M. Tausch

Abb. 5: Screenshot aus dem Teilchenmodell der Flash-Animation [5]



Bergische Universität Wuppertal Chemie und ihre Didaktik © 2013, M. Zepp | M. Tausch

Abb. 6: Screenshot aus dem Energiestufenmodell der Flash-Animation [5]