

University of Groningen

Kunststoff-Solarzellen

Hummelen, J.C.

Published in:
Praxis der Naturwissenschaften

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:
2010

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):
Hummelen, J. C. (2010). Kunststoff-Solarzellen. *Praxis der Naturwissenschaften*, 59(2), 31-34.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

nen Durchmesser von ca. 600 nm und eine Höhe von ca. 100 nm haben und wie in Abbildung 5 orientiert auf einer Goldoberfläche aufgebracht sind, konnte die Photolyse von Wasser realisiert werden [1].

4 | Zusammenfassung

Die Kombination von anorganischen Festkörpern mit geordneten Hohlräumen (z. B. Zeolithe) mit photoaktiven organischen oder anorganischen Verbindungen (z. B. Farbstoffen oder Silberverbindungen) ermöglicht es, maßgeschneiderte Bauelemente zu entwerfen und zu synthetisieren, die als Antennen und Konverter für Solarlicht eingesetzt werden können. Ihre Funktionsweise entspricht der von Lichtantennen bei der natürlichen Photosynthese. Sie können bei zukünftigen Ent-

wicklungen von Solarzellen und von Photokatalysatoren für die Wasserspaltung einen wichtigen Beitrag leisten.

Literatur

- [1] G. Calzaferri, A. Devaux in the Second Volume of the Wilhelm Ostwald Edition, in press
- [2] W. Ostwald, Die Mühle des Lebens, Theod. Thomas Verlag, Leipzig, 1911
- [3] G. Ciamician, Science, 36, 385–394 (1912)
- [4] V. Balzani, A. Credi, M. Venturi, ChemSusChem 1, 26–58 (2008)
- [5] M. Tausch, R.-P. Schmitz, www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de > Flashanimationen > Ein Fall für zwei
- [6] Th. Förster, Ann. Physik (Leipzig), 2 (6), 55–57 (1948)
- [7] G. Calzaferri, S. Huber, H. Maas, C. Minkowski, Angew. Chem. 115, 2003, 3860–3888; Angew. Chem. Int. Ed. 42, 2003, 3732–3758.
- [8] G. Calzaferri, K. Lutkouskaya, Photochem. Photobiol. Sci. 7, 2008, 879–910.
- [9] D. Brühwiler, G. Calzaferri, T. Torres, J. H. Ramm, N. Gartmann, L.-Q. Dieu, I. López-Duarte, M. Victoria Martínez-Díaz, J. Mater. Chem. 2009, DOI: 10.1039/b907308f

[10] Ch. Baerlocher, W. M. Meier, D. H. Olson, Atlas of Zeolite Framework Types, Elsevier, Amsterdam, 5th edn. 2001

[11] International Zeolite Association, <http://www.iza-structure.org>

[12] H. Maas, G. Calzaferri, Angew. Chem Int. Ed. 41, 2284–2288 (2002)

[13] R. Koeppel, O. Bossart, G. Calzaferri, N. S. Sariciftci, Sol. Ener. Mat. Lo. Cells. 91, 986–995 (2007)

[14] H. Langhals, Nachr. Chem. Tech. Lab. 28 (1980) 716–718.

[15] G. Calzaferri, A. Kunzmann, D. Brühwiler, Ch. Baur, CH-698333 (2009)

Anschriften der Verfasser

Gion Calzaferri, Department of Chemistry and Biochemistry University of Bern, Freiestrasse 3, CH-3012 Bern, Switzerland,
E-Mail: gion.calzaferri@iac.unibe.ch
André Devaux, Physikalisches Institut, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster, D-48149, Germany
Michael W. Tausch, Bergische Universität Wuppertal, Gaußstr. 20, 42119 Wuppertal,
E-Mail: mtausch@uni-wuppertal.de

Kunststoff-Solarzellen

J. C. Hummelen

1 | Einführung

Die klassischen Solarzellen (Photovoltaikzellen, PV-Zellen) auf der Basis von Silicium sind recht effizient und sehr langlebig. Bisher liegt das Haupthindernis für eine großtechnische Anwendung in den hohen Produktionskosten. Während die Silicium-Solarzellen mit der Zeit preisgünstiger werden und vielleicht irgendwann so preiswert sind, dass der Kostenfaktor kein Problem mehr darstellt, sind andere Forschungsansätze mit dem Ziel einer Reduktion des Kostenfaktors bezüglich PV verfolgt worden. Solarzellen mit wesentlich dünneren Schichten, in denen Lichtenergie in elektrische Energie umgewandelt wird, sind günstiger, da weniger des hochwertigen Materials pro Fläche benötigt wird. Diese „Dünnschicht-PV-Technologie-Zellen“ haben aktive Schichten, die bis zu 1000-mal dünner sind als die klassischer Silicium-PV-Zellen. Eine weitere Alternative der Kostendämpfung ist eine Verringerung der Produktionskosten. Bei der Produktion von Silicium und bei der Herstellung von Siliciumzellen sind teilweise Hochtemperaturprozesse und Produktionsschritte im (Hoch-)Vakuum notwendig. Das Aufbringen von Schichten durch einfache Druck-

verfahren ist im Vergleich zur Abscheidung durch Verdampfen wesentlich günstiger. Druckverfahren bringen weiterhin den Vorteil, dass Produkte in sehr großem Maßstab erzeugt werden können, was in einer Zukunft, in der PV-Produkte mehr als 25 % des Weltbedarfs an elektrischer Energie decken, notwendig ist.

Im Jahr 2008 waren weltweit zwischen 10 und 100 Quadratkilometer Solarpaneele installiert. In den nächsten 15–30 Jahren sollte diese Zahl auf einige Zehntausend Quadratkilometer pro Jahr anwachsen. Auch wenn es sicherlich nicht die einzige Option ist, kann die Kunststoff-PV-Zellen-Technologie als ein guter Kandidat für die Versorgung der Welt mit diesen großen Chargen zu annehmbaren Kosten angesehen werden, da sie in günstiger Weise den Aspekt der dünnen Schichten mit dem des geringen Energieinputs, niedrigen Kosten und großtechnischen Herstellungsmethoden vereint. Schließlich sind die Rohstoffe für Kunststoff-Solarzellen aus organischen Materialien auf unserem Planeten in großen Mengen vorhanden.

In Abbildung 1 (vgl. auch Titelbild und Seite 52 dieses Heftes) sind zwei Beispiele von Kunststoff-Solarzellen und deren Anwendung dargestellt.

2 | Die Funktionsweise von Kunststoff-Solarzellen

Die aktiven Schichten von Solarzellen bestehen aus Halbleitern. Es gibt einige wichtige Unterschiede zwischen anorganischen und organischen Halbleitern, welche auch eine andere Herstellungsweise organischer Solarzellen bedingen. Organische Materialien bestehen aus Molekülen. Diese können normale („kleine“) Größe (mit molaren Massen unter 2000 g/mol) haben oder Polymere (Makromoleküle) mit molaren Massen von bis zu einigen Millionen Gramm pro Mol sein. Daher werden Solarzellen mit wenigstens einer Polymerart in der aktiven Schicht Kunststoff-Solarzellen genannt. Sie gehören zu der Gruppe der organischen Solarzellen. Zum Verständnis der Funktionsweise von Kunststoff-Solarzellen ist es wichtig, auf den Unterschied zwischen anorganischen und organischen Halbleitern einzugehen. Wenn ein Lichtteilchen (ein Photon) von einem anorganischen Halbleiter absorbiert wird, werden gleichzeitig zwei freie Ladungen, ein „Loch“ (+) und ein Elektron (–) gebildet. Die Lichtabsorption in einem molekularen Halbleiter findet mehr oder weniger in einem Molekül statt, was zur elektronischen Anregung dieses



Abb. 1a: Kunststoff PV-Zellen in den ersten Anwendungsprodukten. Bushaltestelle mit Dach aus Kunststoff PV-Zellen in San Francisco von 3Form/Konarka; © Matthew Roth (2009)

Moleküls führt, d. h. eines der Elektronen dieses Moleküls ist in einen elektronisch angeregten Zustand überführt worden. Das Molekül befindet sich nun nicht mehr im Grundzustand, sondern im angeregten Zustand (dieser wird als „Exciton“ bezeichnet, wenn die Moleküle im festen Aggregatzustand vorliegen, wie es in der aktiven Schicht einer Solarzelle der Fall ist). Das bedeutet auch, dass das Elektron innerhalb des Moleküls im Durchschnitt einen etwas anderen Platz einnimmt, wobei es sich immer noch im gleichen Molekül befindet. Das Loch (die positive Ladung) und das angeregte Elektron, sind in einem angeregten Molekül räumlich sehr dicht bei einander und – da positive und negative Ladungen sich anziehen – recht stark im Exciton gebunden. Loch und Elektron können sich nicht einfach voneinander entfernen, da sie sich einerseits anziehen und andererseits für eine Trennung (ein Auseinanderdriften) eine der beiden Ladungen auf ein anderes Molekül überspringen müsste. Dies erfolgt in der Regel nicht. Was hingegen geschehen kann (und was auch tatsächlich passiert!), ist, dass das angeregte Molekül seine überschüssige Energie an ein benachbartes Molekül abgibt (Energietransfer). Folglich wandert das Exciton. Dies kann sehr effektiv über einen Resonanzmechanismus erfolgen. Dies ähnelt den Vorgängen, die ablaufen, wenn man nur eine der Saiten einer Gitarre in Schwingung versetzt und diese nach einer bis zwei

Sekunden anhält: Man hört das Geräusch der Bewegung der anderen Saiten. Die Energie (in diesem Fall nur ein Teil davon) wurde von der ursprünglichen Saite auf einige der anderen transferiert, die damit in Resonanz stehen. Obwohl der Energie-transfer von einem Molekül zum anderen sehr effizient sein kann, ist die durchschnittliche Entfernung, über die sie in molekularen Materialien übertragen werden kann, auf 5–10 Nanometer begrenzt (es kann also durchschnittlich 5–10 Energieübertragungen von Molekül zu Molekül geben bevor das Exciton „stirbt“, indem es als Wärme emittiert wird). Dies ist eine wichtige Begrenzung und man muss beim Bau effizienter molekularer Solarzellen einen Trick anwenden, um zu verhindern, dass Excitonen zu weit in dem Material wandern müssen, bevor sie in freie Ladungen aufgeteilt werden.

Mit dem Ziel freie Löcher und Elektronen in molekularen Materialien zu erhalten, muss man zwei verschiedene Arten von Molekülen haben, um den Elektronentransfer aus dem angeregten Molekül auf ein benachbartes Molekül zu ermöglichen. Damit dieser Elektronentransfer erfolgen kann, sollte ein Nachbarmolekül eine größere Affinität für Elektronen haben als das angeregte Molekül. Daher muss man in Kunststoff-Solarzellen, wie in allen anderen effizienten molekularen Solarzellen, verschiedene Molekülarten, so genannte Elektronendonoren und Elektronen-Akzeptoren ein-



Abb. 1b: Solartasche mit integriertem Kunststoff-PV-Modul von Neuber/Konarka.

setzen, um freie Elektronen und Löcher zu generieren. Wenn ein Donor-Molekül angeregt ist, kann es sein angeregtes Elektron an ein benachbartes Akzeptor-Molekül abgeben. Für den Fall, dass ein Akzeptor-Molekül angeregt ist, kann dieses von einem benachbarten Donor-Molekül im Grundzustand ein Elektron aufnehmen. In beiden Fällen entsteht dieselbe Situation: ein positiv geladenes Donor-Molekül (das einen Unterschuss von einem Elektron hat) und ein negativ geladenes Akzeptor-Molekül (das ein überschüssiges Elektron hat). Der hier beschriebene Prozess ist sehr ähnlich zu Vorgängen im pflanzlichen Photosynthesystem und wird als photoinduzierter Ladungstransfer bezeichnet.

In Abbildung 2 wird der photoinduzierte Ladungstransfer auf zwei verschiedene Weisen gezeigt. Einerseits unter Angabe der beiden Molekülarten, ihrer Struktur und des Transferprozesses im Raum und zweitens in einem Energiediagramm. Im Energiediagramm wird deutlich, dass der Prozess einer Elektronenpumpe gleichkommt, durch die die Elektronen auf höhere Energiestufen angehoben werden. Das Elektron verlässt die Solarzelle aus einem hohen Energieniveau, sodass es außerhalb der Zelle elektrische Arbeit verrichten kann, bevor es in das niedrigere Energieniveau zurückkehrt. Um das Energiediagramm zu verstehen, muss man wissen, dass a) Elektronen nur bestimmte Energiestufen besetzen können, während sie sich innerhalb eines Moleküls befinden, dass b) immer nur ein Elektronenpaar dieselbe Energiestufe besetzen kann und dass c) nach der Absorption eines Photons von einem solchen Elektronenpaar jeweils nur eines in ein höheres leeres Energieniveau befördert werden kann.

Im linken Teil der Abbildung 2 wird ein lichtabsorbierendes Polymer-Molekül mit seinem photoaktiven Teil (gelb) und mit den Seitenketten, die es löslich machen (schwarz), gezeigt. Es handelt sich um Poly(3-hexylthiophen), abgekürzt P3HT, das hier als Donor-Molekül fungiert. Als Akzeptor-Molekül wirkt in diesem Fall ein Fullerenderivat. Es verfügt ebenfalls über eine Seitenkette, die eine bessere Löslichkeit bewirkt. Das in Abbildung 2 dargestellte Fullerenderivat ist als PCBM bekannt (1-(3-methoxycarbonyl)-propyl-1-phenyl-(6,6)-methanofulleren). Der Prozess läuft wie folgt ab: Ein Photon trifft auf das Polymer (Linie) und regt das Molekül an (nicht abgebildet: das Exciton wird gebildet, d. h. ein Elektron wird in eine höhere Energiestufe im Molekül angehoben). Sehr schnell darauf folgend (in ca. 0,000000000000004 Sekunden) springt das Elektron aus dem höheren Energieniveau in ein leeres Orbital im gelb dargestellten Teil des Akzeptor-Moleküls, was zu einem positiv geladenen P3HT-Molekül und einem negativ geladenen PCBM-Molekül führt (die Produkte sind in Abb. 2 nicht dargestellt).

Im rechten Teil der Abbildung 2 sind in gelb die Orbitalenergien im Donor-Molekül (D) dargestellt, in grau die Orbitalenergien im Akzeptor-Moleküls (A). In jedem Molekül sind die Orbitale, deren Energie unter der der höchsten besetzten Energiestufe liegt und die des höchsten besetzten Molekülorbitals (HOMO) mit je zwei Elektronen besetzt, hier dargestellt durch kleine schwarze Pfeile (mit entgegengesetzten Pfeilspitzen innerhalb eines Orbitals). Jedes Molekül besitzt eine Reihe energetisch höher liegender leerer Orbitale, von denen das niedrigste unbesetzte Molekülorbital (LUMO) dasjenige mit der geringsten Energie ist. Beide Moleküle sind hier so gezeichnet, als wären

sie den Elektroden (Anode und Kathode) einer Solarzelle unmittelbar benachbart. Dies ist natürlich in der Realität nicht der Fall, aber zur Vereinfachung werden die Wanderungen der Elektronen und Löcher in der tatsächlichen aktiven Schicht nicht dargestellt. Der Prozess läuft wie folgt ab: Ein Photon wird vom Polymer absorbiert, es kommt zur Anregung des Moleküls. Ein Elektron wird vom gelb dargestellten HOMO in das erste höher liegende leere Molekülorbital abgehoben, dem gelb dargestellten LUMO (Aufwärtspfeil). Wie im linken Bildteil, springt dieses Elektron aus dem LUMO des Donor-Moleküls in das energetisch etwas niedriger liegende grau dargestellte LUMO des Akzeptor-Moleküls (Pfeil), was zu einem positiv geladenen Donor-Molekül und einem negativ geladenen Akzeptor-Molekül führt.

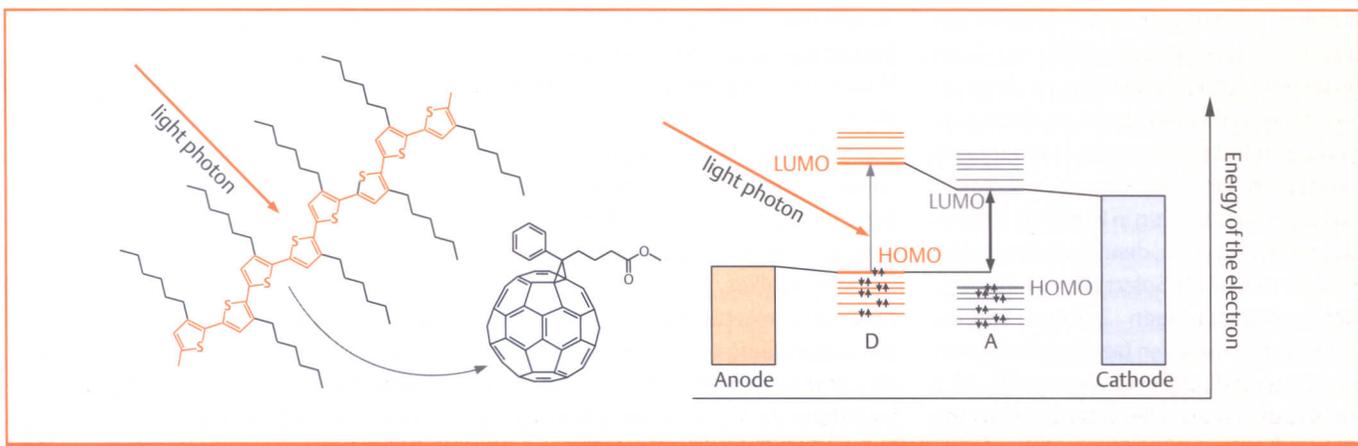
In einer Solarzelle wie der hier skizzierten können auch weitere Prozesse ablaufen: Die weiteren schwarz gezeichneten Pfeile stellen dar, wie die Elektronen (energetisch betrachtet) von der Anode in das entstehende Loch im Donor HOMO (gelb) und vom grau gezeichneten LUMO zur Kathode fließen können. Die Elektroden habe unterschiedliche „Höhen“ in dieser Darstellung, was bedeutet, dass eine der metallisch leitenden Elektroden edel (die Anode, edel wie Gold, aber in molekularen Solarzellen verwendet man stattdessen „edle“ transparente leitende Oxide) und die andere Elektrode unedel ist (wie Aluminium oder sogar Calcium, was aber nicht sehr stabil ist). Dadurch passen die Energien der Elektroden gut mit dem gelb dargestellten HOMO und entsprechend mit dem grau dargestellten LUMO. Dies ist sehr wichtig, da so die Elektronen automatisch innerhalb der aktiven Schicht in eine Richtung fließen.

Da die Excitonen nicht weit wandern können und weil man einen Donor und einen Akzeptor benötigt, um „freie“ Ladungen zu erhalten, müssen die Donor- und Akzeptor-Moleküle in einer Distanz von 5–10 nm überall in der aktiven Schicht verteilt sein. Um das gesamte einstrahlende Licht (bzw. 99 % davon) absorbieren zu können, muss die Dicke der aktiven Schicht in einer Größenordnung von 200–400 nm liegen. Das hat zur Folge, dass man ein *Gemisch* aus Donor- und Akzeptor-Molekülen einsetzen muss. Wenn die Löcher und Elektronen aus der Solarzelle austreten können sollen, unabhängig davon, wo sie innerhalb der aktiven Schicht gebildet wurden, muss die aktive Schicht ein *kontinuierlich interpenetrierendes Netzwerk* der beiden Molekülarten sein. Man kann sich zur Veranschaulichung zwei dreidimensionale maschen-drahtartige Netze vorstellen, die miteinander so verwoben sind, dass sich die Teilchen beider Drahtnetze immer in direkter Nachbarschaft befinden. Solarzellen dieser Art, zu denen auch die Kunststoff-Solarzellen zählen, werden als „bulk heterojunction“-Solarzellen bezeichnet, da die Phasengrenzfläche beider molekularer Materialien überall in der aktiven Schicht ist. Eine Skizze solcher Strukturen ist in Abbildung 3 dargestellt.

Oben links in Abbildung 3 ist die Skizze einer „bulk heterojunction“ der aktiven Schicht, von der Seite betrachtet, dargestellt. Dies ist eine realistische Struktur, die sich spontan beim Trocknen der gedruckten Schicht bilden kann. Die hellen und dunklen Bereiche stellen die Bereiche der Donor- und Akzeptor-Materialien dar (Größenordnung: 1 000 000 : 1, d. h. 1 cm = 10 nm).

Die Skizze oben rechts in Abbildung 3 stellt eine idealisierte, hochgeordnete Version

Abb. 2: Photoinduzierter Elektronentransfer



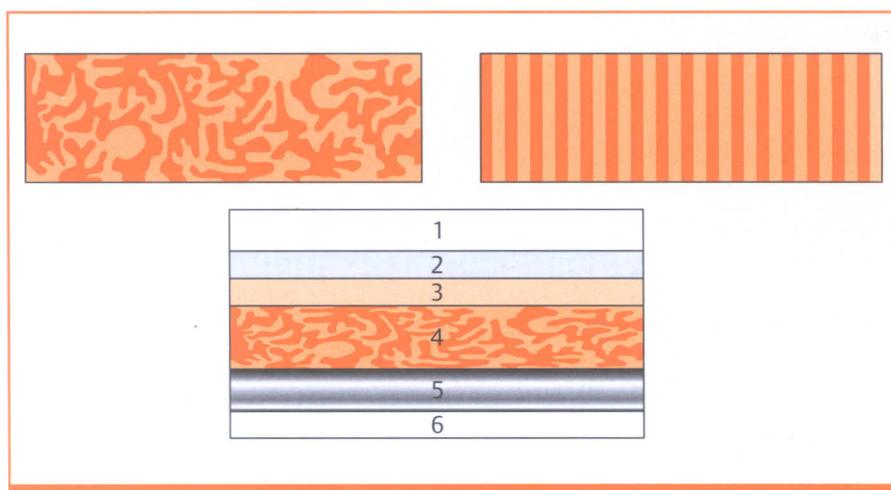


Abb. 3: Die „bulk heterojunction“ und eine typische Kunststoff-Solarzelle

einer „bulk heterojunction“ in Seitenansicht dar. Derartig perfekte nanostrukturierte Schichten können derzeit noch nicht hergestellt werden.

Im unteren Teil der Abbildung 3 sind die Schichten einer ganzen typischen Kunststoff-Solarzelle in Seitenansicht dargestellt. (1) ist eine stabilisierende und schützende Schicht aus Glas oder Kunststoff, (2) ein anorganisches transparentes leitfähiges Oxid (TCO), (3) ein organischer transparenter Lochleiter als Anode (PEDOT:PSS); (4) die „bulk heterojunction“, also die photoaktive Schicht; (5) die metallische Rückseiten-elektrode (Kathode; z. B. Aluminium); (6) eine Schutzschicht.

3 | Auf dem Weg zu einer wettbewerbsfähigen und nachhaltigen PV-Technologie

● Die besten Moleküle für diese Solarzellen absorbieren Licht des gesamten sichtbaren Spektrums (Licht der Wellenlängen zwischen ungefähr 400 nm und 800 nm). Es ist zudem wichtig, dass der Donor und der Akzeptor mit ihren Energieniveaus so zueinander passen, dass ein Elektron den Sprung aus dem angeregten Donor-Molekül auf das Akzeptor-Molekül vollziehen kann (oder vom Donor-Molekül zum angeregten Akzeptor-Molekül). Nach der Anregung durch das Photon soll weder beim Energie- noch beim Elektronentransfer mehr Energie als nötig in Form von Wärme abgegeben werden, denn jeder Verlust an Energie macht die Solarzelle weniger effizient. Berechnungen zufolge können Kunststoff-Solarzellen (realistischerweise) eine Umwandlungseffizienz von 15–20 % erreichen, wenn alle oben genannten Eigenschaften optimiert werden und die

aktive Schicht gleichzeitig ein ebenso guter Leiter für Löcher wie für Elektronen ist, so dass die Ladungen die Zelle effizient verlassen können. Man ist zuversichtlich, dass dieses Ziel erreicht werden kann, allerdings sind dafür weitere Forschungen in den nächsten 5 bis 20 Jahren nötig. Seit der Entdeckung der Kunststoff-Solarzellen im Jahr 1995 ist die Effizienz stetig von anfangs 0,5 % zum derzeitigen Weltrekord von 7,9 % (November 2009, Firma Solarmer) gestiegen. Besonders während der vergangenen fünf Jahre ist die Effizienz stark verbessert worden, auch weil viele Forschungsgruppen ihre Arbeit in diesem Feld aufgenommen haben. Aber die Effizienzen kommerzieller Produkte sind, wie bei allen Arten von Solarzellen, signifikant niedriger. Folglich haben Kunststoff-Solarzellen des Jahres 2009, wie sie z. B. von der Firma Konarka produziert werden, eine Energieumwandlungseffizienz von ca. 2–3 %. Obwohl dies niedrig ist, können diese Module kostengünstig hergestellt werden und es gibt bereits viele mögliche Anwendungen für diese leichten, mechanisch flexiblen Solarmodule. Im Sommer 2009 haben Kunststoff-Solarzellen Einzug in die Straßen von San Francisco gehalten, eingebettet in wellenförmige transparente Polycarbonat-Gastfolien als attraktive Dachungen von Bushaltestellen. Die Stadt plant die Installation von weiteren 1100 solcher Haltestellen. Die Firma Skyshades entwickelt neue Versionen ihrer Beschattungsprodukte mit integrierten Kunststoff-Solarzellen.

Außer der Steigerung der Effizienz der Energieumwandlung ist es weiterhin wichtig, die Lebenszeit der Kunststoff-Solarzellen zu erhöhen. Typische Solarzellen, wie die herkömmlichen auf Silicium-Basis, haben

garantierte Lebenszeiten von über 25 Jahren. Kristallines Silicium und viele andere anorganische Halbleiter sind sehr stabile Materialien, auch unter starker Sonneneinstrahlung. Im Gegensatz dazu sind organische elektronische Materialien wie halbleitende Polymere (typische Donor-Materialien) und Fulleren-Derivate (typische Akzeptor-Materialien) von Natur aus instabil in Gegenwart von Wasser und Sauerstoff, besonders in Kombination mit Licht. Demzufolge sind Schutzschichten, die die Zelle gegen Wasser und Sauerstoff abschirmen notwendig, damit die aktive Schicht trotz Sonneneinstrahlung unversehrt bleibt. Die größte Herausforderung ist es, sehr effiziente Schutzschichten zu finden, die zu einer geringst möglichen Kostensteigerung der Zelle führen und die den Modulen zu Lebenszeiten von 10 Jahren oder länger verhelfen.

Kunststoff-Solarzellen basieren auf molekularen Halbleitern. Die meisten der heutigen molekularen Halbleiter sind nicht löslich in Wasser. Aber das kann (und sollte) relativ leicht änderbar sein. Diese Änderung öffnet neue Wege in einer revolutionären *green chemistry*, beispielsweise unter Zuhilfenahme enzymatischer Prozesse. Auf diese Weise ist es auch möglich, biologisch abbaubare Halbleiter herzustellen. Das ist keine Science-Fiction, sondern es wird tatsächlich geschehen und Kunststoff-Solarzellen zu einer unerlässlichen Technologie im Rahmen der nachhaltigen Erzeugung von Strom werden lassen.

Literatur

[1] G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl, A. J. Heeger, *Science* 270, 1789 (1995)

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Jan C. Hummelen, Molecular Electronics, Stratingh Institute for Chemistry, University of Groningen, Nijenborgh 4, 9747 AG, Groningen, The Netherlands, E-Mail: j.c.hummelen@rug.nl