

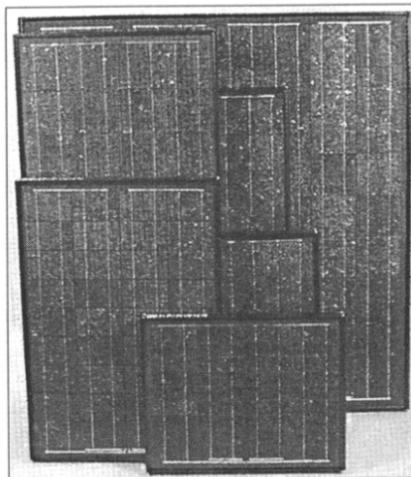
Solarzellen aus Plastik –

Neue Perspektiven für die Photovoltaik

Von J. Brabec, N. S. Sariciftci

Die Notwendigkeit kostengünstiger erneuerbarer Energiequellen zu entwickeln, fördert die Forschung und Entwicklung von neuen Lösungsansätzen für die Produktion von effizienten photovoltaischen Zellen. Obwohl anorganische Halbleiter (Silizium, amorphes Silizium, Gallium Arsenid, Sulfid Salze) im Fokus der Forschung und Entwicklung stehen, bieten sowohl die Photosensitivität als auch die photovoltaischen Effekte von konjugierten Polymeren [1] und organischen Molekülen [2] Alternativen an.

Die Verwendung von konjugierten Polymeren für photonische Anwendungen ist ein relativ junges Forschungsgebiet der physikalischen Chemie. Für die Industrie sind konjugierte Kunststoffe zu-



kunststrächtige Werkstoffe für photonische Bauelemente (Leuchtdioden, Sensoren, Photodetektoren, Solarzellen), da sie die wichtigen elektronischen und optischen Eigenschaften von Halbleitern und

Metallen mit den attraktiven mechanischen und verarbeitungstechnischen Eigenschaften von Kunststoffen kombinieren. Speziell bei photovoltaischen Anwendungen, die große Flächen benötigen um hohe Stromausbeuten zu erzielen, könnte man mit auf Kunststoff basierenden Solarzellen durch die kostengünstige Großflächenproduktion auf flexiblen Substraten beliebiger Form große Vorteile gewinnen. Für die wissenschaftliche Forschung sind konjugierte Kunststoffe interessant, da sie die Untersuchung von elektronischen und optischen Eigenschaften von quasi-eindimensionalen Systemen ermöglichen. Generell werden Kunststoffe mit ausgedehnten π -Elektronensystemen, bei denen abwechselnd Einfach- und Doppelbindungen aufeinander folgen, als konjugierte Kunststoffe bezeichnet. Durch die Konjugation vieler π -Elektronen bildet sich in einer Kunststoffkette aus dem höchsten besetzten Molekülorbital (HOMO) ein breites Band von besetzten Zuständen (Valenzband) und aus dem niedrigsten unbesetzten Molekülorbital (LUMO) ein Band von unbesetzten Zuständen (Leitungsband) aus. Man erhält also für konjugierte Polymere Energiebänder wie für andere Festkörper. Auf Grund dieser Analogie zu den klassischen, anorganischen Halbleitern wie Silizium, und der Analogie, daß diese Kunststoffe durch Dotieren vom nicht leitenden in den metallisch leitenden Zustand gebracht werden können, werden sie auch halbleitenden Kunststoffe genannt. Die Besonderheit bei den Polymer-Halbleitern ist allerdings die „quasi“ Eindimensionalität, bedingt durch die Fadenstruktur der Polymere. Beispiele für halbleitende Kunststoffe sind die Polyphenylene, Polyvinylphenylene, Polythiophene oder Polyaniline.

Die Energiekonversionseffizienz von photovoltaischen Polymerzellen, hergestellt aus einer einzigen konjugierten Polymerart, ist typischerweise zwischen $10^{-3}\%$ - $10^{-2}\%$. Dieser Wirkungsgrad ist zu gering für eine kostengünstige Stromerzeugung. Die Entdeckung des ultra-

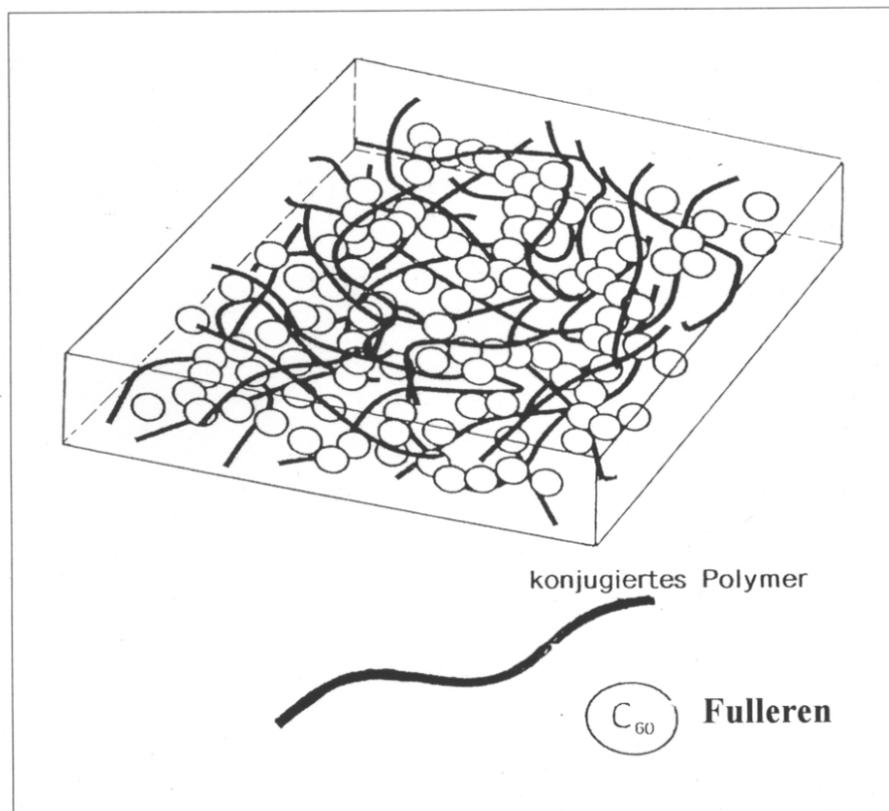


Abbildung 1 : Schematisches Diagramm für ein gegenseitig durchdringendes Netzwerk von konjugierten Kunststoffen und Fullerenen.

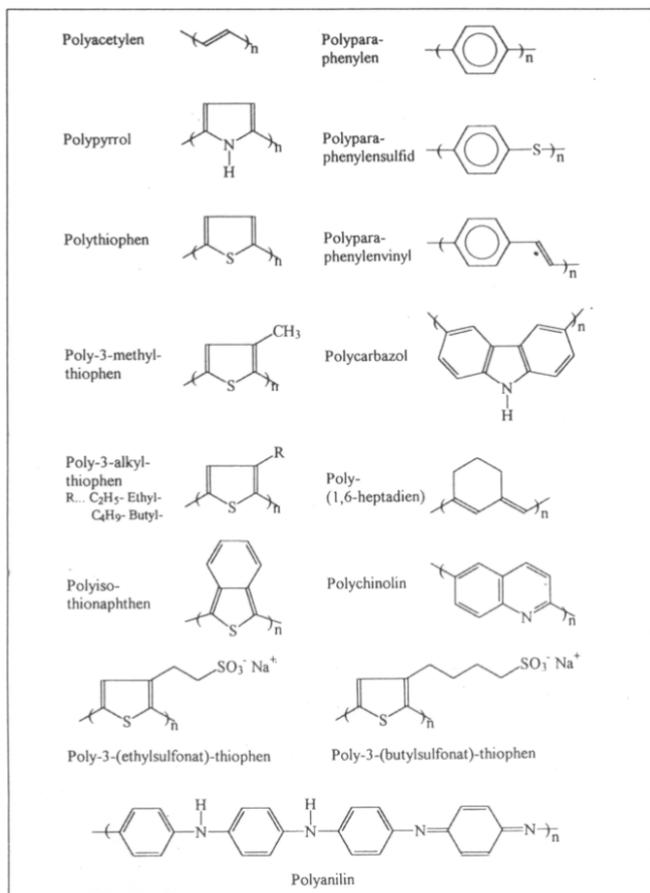


Abbildung 2 : Gängigsten konjugierten Polymere, die sich als Elektronendonoren für Kunststoff-solarzellen eignen, also im angeregten Zustand leicht oxidierbar sind.

schnellen photoinduzierten Elektronentransfers an Grenzflächen zwischen konjugierten Polymeren, die als Elektronendonoren wirken, und Buckminsterfullerenen C_{60} , die als Elektronenakzeptoren fungieren [3], ermöglicht einen molekularen Zugang zu hocheffizienten photovoltaischen Konversionen. Da in halbleitenden Kunststoffen der Ladungstransfer ungefähr 1000 mal schneller ist als alle anderen konkurrierenden strahlenden und nicht strahlenden Relaxationsprozesse, ist die Quanteneffizienz für die optisch induzierte Ladungserzeugung in der Größenordnung von eins. Dieser ultraschnelle Elektronentransfer an Donor-Akzeptor Zwischenflächen ist also eine sehr effektive Methode, um die in organischen Materialien übliche Ladungsträgerrekombination zu verhindern. Wie effektiv C_{60} an diesem Ladungstransfer beteiligt ist, sieht man daran, daß durch Beimischen von nur 1% C_{60} der Photostrom um eine Größenordnung erhöht wird.

Die potentiellen Vorteile von einer Solarzelle auf Kunststoffbasis gegenüber von herkömmlichen Siliziumsolarzellen liegen klar auf der Hand:

- Geringe Herstellungskosten

- Hohe Stromausbeuten (durch Großflächentechnologien)
- Flexibilität und einfache Handhabung (mechanische Eigenschaften von Kunststoffen)
- Hohe Umweltverträglichkeit (Kunststoffe auf Kohlenstoffbasis)

Die Physik einer Kunststoff-solarzelle

Die ersten Kunststoff-solarzellen, die aus konjugierten Polymeren (Elektronendonoren) und Fullerenen (Elektronenakzeptoren) hergestellt wurden, waren 2 Schicht Solarzellen. Diese Zellen bestehen aus einer dünnen Schicht des konjugierten Polymers, auf die eine

weitere dünne Schicht Fullerene aufgebracht wird. Die photoaktive Substanz in diesen Solarzellen sind die konjugierten Kunststoffe, die unter Lichteinstrahlung in angeregte Zustände übergehen können. Diese Zustände können ihre Anregungsenergie in Form eines Elektrons an ein Fulleren abgeben. Da die vollständig separierten Ladungszustände metastabil sind, können die Ladungen effizient ge-

sammelt und abgeführt werden.

Obwohl die Quanteneffizienz des photoinduzierten Ladungstransfers für ein Donor-Akzeptor Paar in der Größenordnung von eins ist, die Photon-Elektron Konversionseffizienz einer 2 Schicht Solarzelle wäre durch den sehr schmalen Berührungsbereich zwischen Donor und Akzeptor limitiert. Effiziente Ladungstrennung findet nur an Berührungspunkten zwischen Donor und Akzeptor statt, daher werden in einer 2 Schicht Geometrie Photoanregungen, die weit weg von Berührungsgrenzen entstehen, keinen Beitrag zum Photostrom liefern. Konsequenterweise wurde daher für die Kunststoff-solarzelle eine Aufbau entworfen, der die Anzahl an Berührungspunkten zwischen Donoren und Akzeptoren zu maximieren versucht : *ein heterogenes 2 Komponentensystem*. Dabei wird anstatt zweier einzelner, übereinander angeordneter Schichten ein wechselseitig durchdringendes Netzwerk der beiden Komponenten aufgebaut. Der photoaktive Teil dieses Netzwerkes ist natürlich wieder das konjugierte Polymer (der Elektronendonor), das bei Einstrahlung von Licht in einen angeregten Zustand übergeht. Damit diese angeregten Zustände ihre Anregungsenergie in Form eines Elektrons an die Buckminsterfullerene C_{60} (Elektronenakzeptor) abgeben können, wird das C_{60} gleichmäßig in dem konjugierten Polymerfilm verteilt. Je nach Konzentration an C_{60} findet man in solch einem Netzwerk alle 1 bis 100 Monomereinheiten des konjugierten Kunststoffes ein C_{60} Molekül. In der Abbildung 1 sieht man eine Modellskizze von einem gegenseitig durchdringenden Netzwerk.

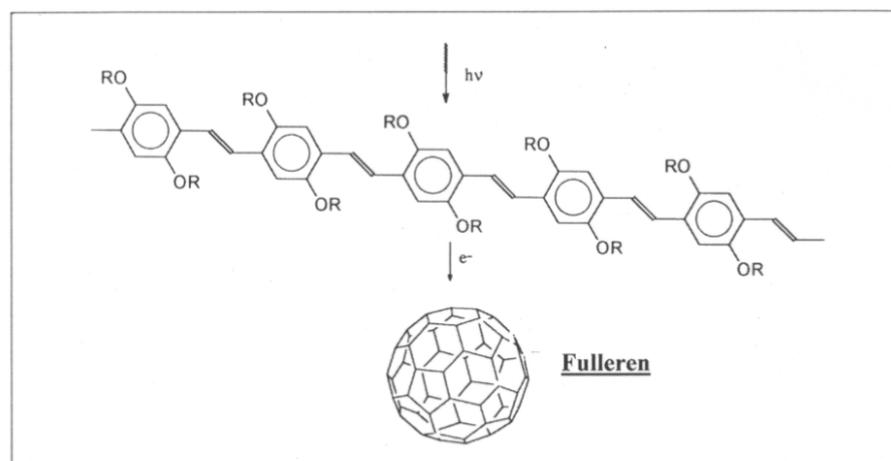


Abbildung 3: Schema einer Photodotierung. Durch Lichteinstrahlung wird ein speziell lösliches Polyphenylvinyl (PPV) mit organischen Seitengruppen angeregt und kann seine Anregungsenergie in Form eines Elektrons an ein Fulleren abgeben. PPV ist also der Elektronendonor, das Fulleren der Elektronenakzeptor.

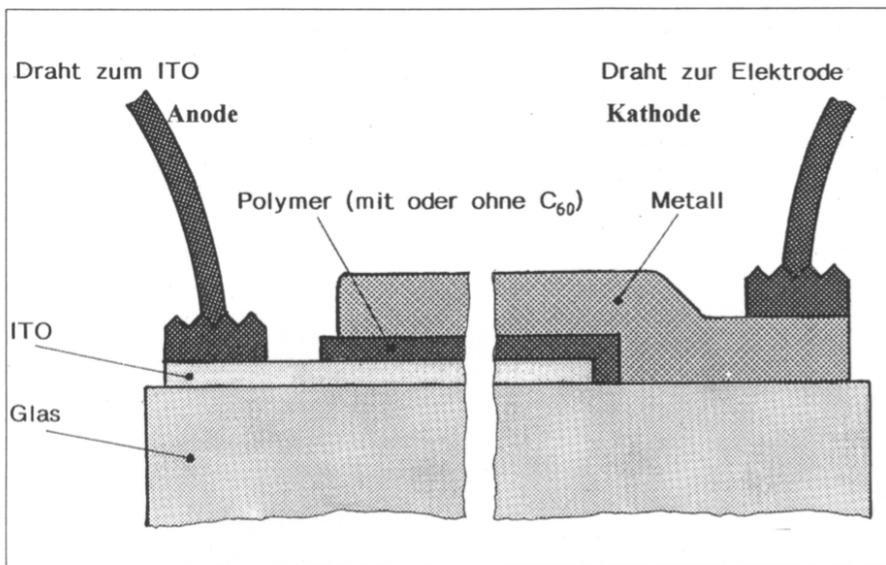


Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer Plastiksolarzelle im Querschnitt. Das Licht fällt durch die durchsichtige Elektrode (ITO auf Glas oder Kunststoff) ein.

Die chemische Struktur von den derzeit am häufigsten untersuchten organischen, photoaktiven Materialien ist in Abbildung 2 gezeigt. Diese konjugierten Kunststoffe besitzen Bandgaps typisch im Bereich von 2 eV. (Zum Vergleich: Das Bandgap von einem nichtleitenden konventionellen Kunststoff wie Polyethylen ist 8,5 eV, das Bandgap eines klassischen, anorganischen Halbleiters wie Silizium liegt bei 1,1 eV). Durch die „quasi“ Eindimensionalität der halbleitenden Polymerketten gibt es trotz der Ähnlichkeit in

der elektronischen Struktur von Polymer-Halbleitern und von klassischen anorganischen Halbleitern einen wesentlichen Unterschied. Während man in p oder n dotierten anorganischen Halbleitern frei bewegliche, delokalisierte Ladungszustände vorfindet, bilden sich in Polymerhalbleitern, unabhängig von der Art der Dotierung, stärker lokalisierte geladene Zustände mit Radikalcharakter aus. Auch ist es wegen der unterschiedlichen Reduktionspotentiale der konjugierten Polymere nur selten möglich, daß man ein Polymer so-

wohl n als auch p dotieren kann. Beinahe alle konjugierten Kunststoffe lassen sich oxidieren, geben also bei der Dotierung ein Elektron an das Dotieragenz ab und liegen dann als Lochleiter vor. Je nach der Art, wie Ladungsträger in das Polymer eingebracht werden, unterscheidet man verschiedene Arten der Dotierung:

- Chemische Dotierung (zum Beispiel durch Beimischen von Iod)
- Elektrochemische Dotierung (zum Beispiel an einer Platin Elektrode)
- Photo Dotierung (Erzeugung von Ladungsträgern durch Lichteinstrahlung)

Das Herz der Plastiksolarzelle ist der reversible ultraschnelle Elektronentransfer der innerhalb von 300 Femtosekunden stattfindet. In Abbildung 3 ist dieses Phänomen schematisch aufgezeichnet. Das System besteht aus 2 Komponenten. Das konjugierte Polymersystem, ein Polyphenylenvinyl (PPV) mit organischen Seitengruppen am Phenylring, die die kunststofftechnologischen Verarbeitungseigenschaften (Löslichkeit, Schmelzbarkeit) des Polymer verbessern, dient als Elektronendonator, das Fulleren übernimmt die Rolle des Elektronenakzeptors. Bei Lichteinstrahlung werden Photonen vom PPV absorbiert und der Kunststoff so in einen angeregten elektrisch geladenen Zustand gebracht, der anschließend das Elektron an das stark elektronegative C_{60} abgeben kann.



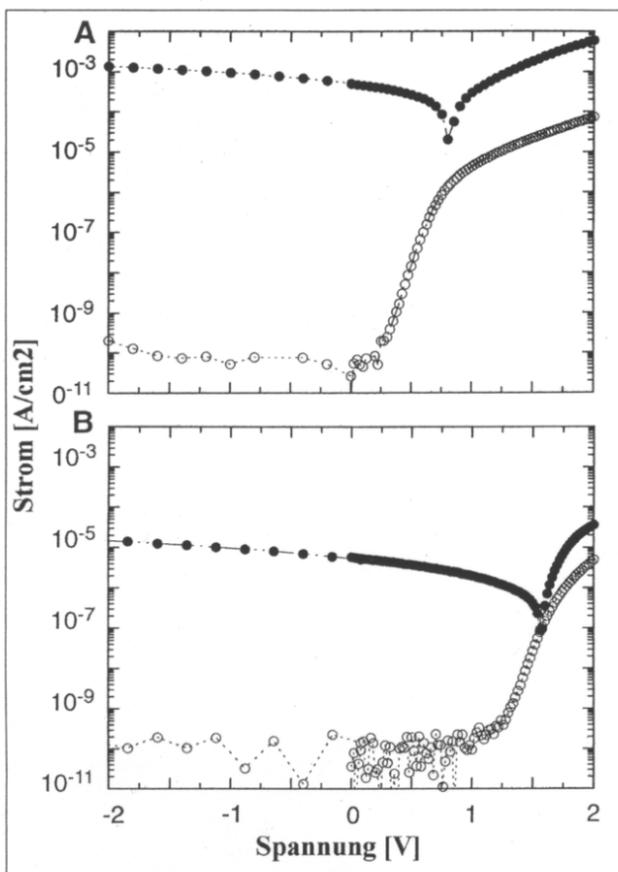


Abbildung 5: Strom-Spannungskennlinien einer Kunststoff-solarzelle mit einer Calcium-Kathode und einer ITO-Anode. Die leeren Kreise geben die Kennlinie im unbeleuchteten Zustand, die vollen Kreise im mit 20 mW/cm^2 bei 430 nm beleuchteten Zustand an. Das obere Bild (A) zeigt die Ergebnisse für eine Kunststoff-solarzelle mit MEH-PPV : [6,6]PC₆₁BM im Gewichtsverhältnis 1:1, das untere Bild (B) präsentiert die Werte für eine Solarzelle nur mit MEH-PPV ohne Beigabe von Fullerenen.

Lichtsammelnde Polymersysteme mit einem photoinduzierten Elektronen-Transfermechanismus finden in der wissenschaftlichen Forschung [4] als auch in wirtschaftlich orientierten Technologien immer mehr Bedeutung. Das besondere Interesse dieser photophysikalischen als auch photochemischen Forschungssparte an Polymeren läßt sich durch die einzigartige Möglichkeit erklären, daß man durch die Entwicklung von neuen chemischen Synthesemethoden die elektronischen Eigenschaften der Donor/Akzeptor-Materialien maßschneidern kann. So wäre es vorstellbar, die Größe und Lage des Bandgaps gezielt zu verändern, um das Absorptionsverhalten der Kunststoffe optimal auf das Sonnenlicht einzustellen.

Produktionstechnologien

Der schematische Querschnitt einer heterogenen 2-Komponenten-Plastiksolarzelle ist in Abbildung 4 skizziert. Der Fer-

tigungsprozess läuft in zwei voneinander unabhängigen Schritten ab. Die Präparation von Kunststoff-solarzellen im Labormaßstab läßt sich bereits mit relativ einfachen Mitteln durchführen. Im ersten Schritt wird ein dünner Kunststoff-film eines konjugierten Polymers (typischerweise PPV) vermischt mit C₆₀ auf eine kommerziell erhältliche Indium/Zinn-Oxid (indium-tin-oxid oder ITO)-Substrat aufgebracht. Diese Elektrode muß gute optische Eigenschaften haben, um das einfallende Licht ohne größere Verluste an die Kunststoffschicht weiterzuleiten. Eine Alternative zu ITO-Trägern sind Gold bedampfte Substrate, die im sichtbaren Bereich ebenfalls semitransparent sind. Je nach der Größe der zu beschichtenden Fläche lassen sich die organischen Filme durch un-

terschiedliche Technologien aufbringen. Während organische Solarzellen, die auf Molekülbasis aufgebaut sind, durch Vakuumverdampfen hergestellt werden, lassen sich Kunststoff-solarzellen bequem aus der Lösung präparieren. Kleinere Flächen im Ausmaß von einigen cm² lassen sich durch Aufschleudern oder Auftropfen aus der Lösung herstellen. Wegen der besseren Homogenität der Polymerfilme wird die Aufschleudertechnik mit einer Lack-schleuder (Spin Coating) bevorzugt. Beim Spin Coating wird eine kleine Menge der Polymer-C₆₀-Lösung auf ein ITO-Substrat, das sich auf einem Drehteller befindet, aufgetropft und anschließend in Rotation versetzt. Neben der Homogenität der Filme ist die Dicke der Filme der wesentliche Parameter für hohe Effizienzen in der Stromausbeute. Beim Spin Coating ist die Dicke der Polymer-C₆₀-Filme von der Drehgeschwindigkeit des Drehtellers, der Viskosität der Lösung und der Siedetem-

peratur des Lösungsmittels abhängig. Je nach Wahl dieser Parameter lassen sich dünne Filme zwischen 100 nm bis einige mm erzeugen. Für große Flächen (A4-Format oder größer) empfehlen sich einerseits die Rakeltechnologie und andererseits Dünnschicht-Drucktechniken. Beim Rakeln wird die Lösung auf das sogenannte Rakelmesser gegossen, das sich in einem wohldefinierten Abstand über dem Substrat befindet. Durch Abziehen von dem Rakelmesser wird die Lösung gleichmäßig über das Substrat verteilt und das Lösungsmittel kann dann langsam verdampfen. Die typische Größenordnung für die Polymer-C₆₀-Filmdicke ist im Bereich von Mikrometern.

Der zweite Prozessschritt besteht aus dem Aufdampfen einer Calcium- oder Aluminiumschicht als Kathode. Bei Kunststoff-solarzellen verwendet man die selbe Definition von Anode (löcherleitende Elektrode) und Kathode (elektronenleitende Elektrode) wie bei Leuchtdioden. Zum Betreiben der Polymersolarzelle müssen positive Ladungsträger (Löcher) aus der Anode und negative Ladungsträger (Elektronen) aus der Kathode abgezogen werden. Idealerweise sollten die Arbeitsfunktionen (Energie, die zum Austritt von negativen Ladungsträgern nötig ist) der Anode und die der Kathode eine möglichst große Differenz haben. Dadurch wird in der Polymer-C₆₀-Mischung ein großes internes Feld erzeugt, das eine automatische Selektion und Trennung der durch Photoinduktion erzeugten Ladungsträger vornimmt. Die Verwendung von ITO als Anode und Aluminium (Al) als Kathode garantiert also, daß die „richtigen“ Ladungsträger auch an die „richtige“ Elektrode transportiert werden. Mit Calcium (Ca) als Kathode würde dieses interne Feld sogar noch größer und die Ladungstrennung dadurch noch effektiver, allerdings ist eine Ca-Kathode gegenüber Umwelteinflüssen deutlich instabiler.

Zusammenfassung der experimentellen Resultate

In Abbildung 5 wird die Strom-Spannungskennlinie einer Solarzelle auf der Basis eines speziell funktionalisierten PPV, dem Poly(2-Methoxy, 5-(2-Ethyl-Hexyloxy)-p-Phenylene Vinylene) (MEH-PPV) im dunklen (offene Kreise) und im mit 20 mW/cm^2 bei 430 nm beleuchteten (volle Kreise) Zustand mit einer MEH-PPV-Fulleren-Solarzelle mit den Ge-

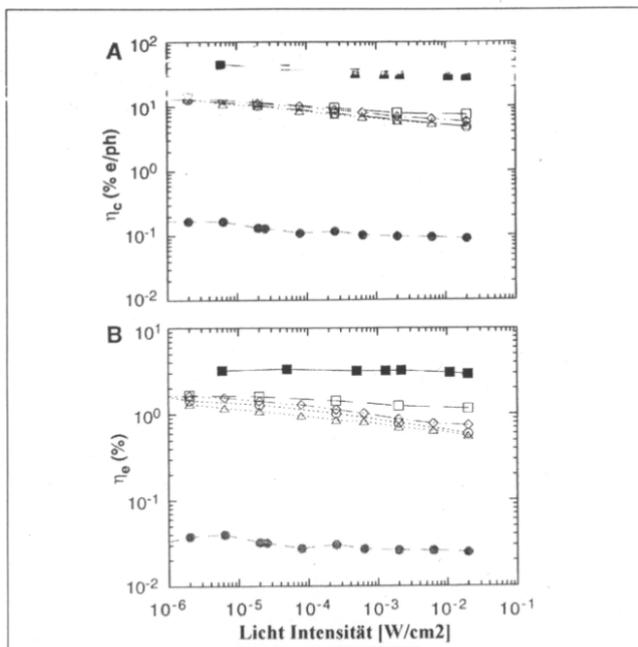


Abbildung 6: Wirkungsgrade η_c (A) und η_e (B) für $\text{Ca}/\text{MEH-PPV}:[6,6]\text{PC}_{61}\text{BM}(1:4)/\text{ITO}$ (volle Quadrate); $\text{Ca}/\text{MEH-PPV}:[6,6]\text{PC}_{61}\text{BM}(1:1)/\text{ITO}$ (offene Quadrate); $\text{Al}/\text{MEH-PPV}:[6,6]\text{PC}_{61}\text{BM}(1:1)/\text{ITO}$ (Diamanten); $\text{Ca}/\text{MEH-PPV}:[5,6]\text{PC}_{61}\text{BM}(1:1)/\text{ITO}$ (offene Kreise); $\text{Ca}/\text{MEH-PPV}:\text{C}_{60}(3:1)/\text{ITO}$ (Dreiecke); und $\text{Ca}/\text{MEH-PPV}/\text{ITO}$ (volle Kreise).

wichtsverhältnissen von 1 : 1 verglichen [5]. In beiden Fällen wird als Kathode Calcium und als Anode ITO verwendet. Bei der Solarzelle mit Fullerenen wurde kein normales C_{60} verwendet, sondern ein speziell substituiertes Fulleren, das $[6,6]\text{PC}_{61}\text{BM}$. Dieses Fulleren zeichnet sich durch exzellente Löslichkeitseigenschaften und hohe Kompatibilität zu dem konjugierten Polymer aus. Figur A zeigt

die Ergebnisse für eine Zelle mit $[6,6]\text{PC}_{61}\text{BM}$, während Figur B die Resultate für eine Zelle ohne $[6,6]\text{PC}_{61}\text{BM}$ angibt. Für die reine MEH-PPV Zelle beobachtet man eine Leerlaufspannung von 1,6 Volt ab der der Strom stark ansteigt. Diese Beobachtung ist konsistent mit der Differenz der Arbeitsfunktionen von Ca und ITO. Ein ähnliches Verhalten findet man auch bei der mit Fullerenen vermischten Solarzelle, die Leerlaufspannung hat sich allerdings auf 0,8 Volt erniedrigt. Dieses Ergebnis ist im Einklang mit der Aus-

trittsarbeit für ein Elektron von dem niedrigsten unbesetzten Molekülorbital [LUMO] von $[6,6]\text{PC}_{61}\text{BM}$ zum Fermi-niveau des Calciums. Würde man statt einer Ca-Kathode eine Al-Kathode verwenden, so verringert sich die Leerlaufspannung weiter auf etwa 0,65 Volt.

Der auffälligste Effekt ist die Erhöhung des Photostromes, der durch die wesentlich erhöhte Photosensitivität im Falle des

Polymer-Fulleren Netzwerks zu erklären ist. Der Kurzschlußstrom für die hier gezeigte MEH-PPV- $[6,6]\text{PC}_{61}\text{BM}$ Zelle ist $0,5\text{mA}/\text{cm}^2$. Das entspricht bei einer Lichteinstrahlleistung von $20\text{mW}/\text{cm}^2$ einer Photosensitivität von $25\text{mA}/\text{W}$ und einen Wirkungsgrad η_c für die Umwandlung von eingestrahlenen Photonen in Elektronen von 8%. Die Effizienz der Solarzelle hat sich durch die Zugabe von Fullerenen um ungefähr 2 Größenordnungen verbessert.

Die Effizienz für die Ladungsträgerkolektion als auch für die Energiekonversion hängt sehr stark von der Morphologie des wechselseitig durchdringenden Netzwerks von konjugierten Polymeren und Fullerenen ab. Durch geringfügige Änderungen bei der Herstellung (Verwendung von anderen Lösungsmitteln für das Spin Coating) und durch Erhöhung der Fullerenkonzentration im Netzwerk lassen sich die Ladungsträgerkonversionseffizienz η_c als auch die Leistungseffizienz η_e weiter verbessern. So wurden bereits Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von $\eta_c \approx 30\%$ und $\eta_e \approx 3\%$ realisiert. Gemessen wurden diese Werte wieder unter Beleuchtung von $20\text{mW}/\text{cm}^2$ mit 430nm . Bei Verringerung der Einstrahlleistung auf $10\text{mW}/\text{cm}^2$ verbessern sich die Wirkungsgrade sogar noch etwas. In Abbildung 6 sind diese Wirkungsgrade für verschiedene Zellen aufgetragen, die von der UNIAX Corporation in Santa Barbara hergestellt wurden.

Die Größe der Solarzellen an denen die Messungen durchgeführt wurden waren im Bereich von mm^2 . Der Grund für diese momentan noch kleinen photovoltaisch aktiven Flächen ist durch die Kurzschlußgefahr der Zellen zu erklären. Bei Polymerfilmdicken von einigen 100 Nanometern ist die Gefahr sehr hoch, daß durch unsachgemäße Behandlung der Polymerfilme beschädigt und die Kathode mit der Anode in Verbindung kommt. Dadurch wird die Solarzelle kurzgeschlossen und es kann zu keiner photovoltaischen Stromgewinnung mehr kommen.

Zukünftige Forschungsziele

Solarzellen auf Kunststoffbasis bieten ein großes Entwicklungspotential für die photovoltaische Stromgewinnung. Bereits 3 Jahre nach der Entdeckung der physikalischen Grundlagen konnten Zellen mit einem Wirkungsgrad von etwa 3% realisiert werden. Um die Vorteile einer Plastiksolarzelle auch wirtschaftlich auszunutzen zu können, wird an der physikalischen Che-

Wir holen für Sie die Sonne vom Dach!



**elektro
korkisch** GMBH

ELEKTRO-SANITÄRINSTALLATIONEN
SOLAR- UND UMWELTECHNIK

1130 Wien, Auhofstraße 120 a
Tel. (0222) 877 25 25, Fax 877 18 66-83

Unser Geschäftsführer, Hr. Gerhard Korkisch, plant mit Ihnen die für Sie optimale Solaranlage (**thermisch und Solarstrom**). Nutzen Sie unsere langjährige Erfahrung beim Einbau von Solarstromanlagen. Interessierte haben bei uns die Möglichkeit, bei der Installation Ihrer Anlage selbst Hand anlegen zu dürfen! Wir liefern auch das kleinste netzparallele Solarstromkraftwerk (100 W_p)

mie der Universität Linz unter Prof. Sariciftci ein Pilotprojekt betrieben. Das Hauptziel dieses Projektes ist die Herstellung eines Prototypen einer großflächigen Plastiksolarzelle auf einem flexiblen Substrat um das technologische Potential dieses Zugangs zur Alternativenergieerzeugung zu demonstrieren. Dabei müssen folgende Probleme gelöst werden:

- **Umwelteinflüsse und Stabilität:**

Die Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf die Langzeitstabilität der Plastiksolarzelle muß untersucht werden. Um eine attraktive Alternative zu den Solarzellen auf Siliziumbasis darzustellen, muß die Kunststoff solarzelle eine vergleichbare Lebensdauer besitzen. So ist es vorstellbar, die Zellen durch eine zusätzliche Hülle gegen Feuchtigkeit, Oxidation oder mechanische Zerstörung zu schützen. Denkbare Möglichkeiten wäre das Einbetten der Zellen in optisch durchsichtige Harze oder das Vakuum-Verschweißen der Zellen in Folien. Technologien zur Konservierung gegen Umwelteinflüsse sind in der Kunststoffindustrie weit verbreitet und sollten einfach für die Plastiksolarzelle adaptiert werden können.

- **Dünnschichttechnologien:**

Ein wesentlicher Parameter, der die Effizienz der Solarzellen beeinflusst, ist die Morphologie der auf die flexiblen, leitenden

Substrate aufgetragenen Polymerfilme. Je homogener und je weniger Verunreinigungen der Polymerfilm hat, desto höher ist die Stromausbeute. Die Anwendbarkeit verschiedener Dünnschichttechnologien für konjugierte Polymere muß untersucht werden bzw. neue Technologien für die Filmherzeugung gefunden werden. Dieser Punkt stellt eine Herausforderung für die angewandte Forschung dar.

- **Verarbeitungsqualität der konjugierten Kunststoffe:**

Zusätzlich zur Verbesserung der Dünnschichttechnologien kann man auch durch gezielte chemische Strukturveränderungen die Verarbeitungseigenschaften immer weiter verbessern. In den letzten Jahren wurden große Fortschritte bei der Löslichkeit der konjugierten Polymere durch Anhängen von funktionellen Seitengruppen erzielt. Vielleicht lassen sich auch die Schmelzeigenschaften dieser Kunststoffe weiter verbessern, so daß es möglich wird die halbleitenden Kunststoffe mit konventionellen Polymertechnologien wie Extrudieren oder Fiberspinnen zu verarbeiten. Es gibt keinen Grund, warum nicht auch die momentan verwendeten Materialien in der Plastiksolarzellenforschung durch strukturelle Modifikationen für die Extrusion oder den Spritzguß adaptiert werden können. Dadurch würde sich die Herstel-

lung der Plastiksolarzellen natürlich sehr vereinfachen, da man die Solarzellen mit den Technologien wie für konventionelle kaschierte oder beschichtete Folien produzieren kann.

- **Adaptierung an das Sonnenlicht:**

Die meisten konjugierten Kunststoffe haben ein Bandgap von 2 eV und höher. Um die Solarzellen optimal an das Sonnenlicht anzupassen, wird ein Bandgap von 1,5 eV als ideal angesehen. Die Entwicklung von konjugierten Kunststoffen mit einem kleinen Bandgap stellt eine große Herausforderung an die organische Chemie. Momentan gibt es noch keine Kunststoffe mit kleinen Bandgaps, die sich für einen Einsatz in Solarzellen eignen würden.

- **Elektrodenwahl:**

Die genauen physikalischen Vorgänge an den Elektrodenkontakten sind noch nicht ausreichend untersucht. Für eine maximale Stromausbeute müssen die Elektrodenkontakte optimiert werden. Zwei Faktoren bestimmen die Wahl der Elektrodenkontakte. Einerseits wird versucht, die Auswahl für die Anode und Kathode so zu treffen, daß die Arbeitsfunktionen einen großen Unterschied aufweisen damit es zu hohen internen Feldern im Polymerfilm kommt. Weiteres wäre es vorteilhaft, wenn die Arbeitsfunktion der Anode ver-

gleichbar mit dem höchsten besetzten Molekülorbital (HOMO) des Donors wäre und die Arbeitsfunktion der Kathode mit dem niedrigsten unbesetzten Molekülorbital (LUMO) des Akzeptors wäre. Dadurch würden sich an den einzelnen Elektroden ohmsche Kontakte für die Ladungsträger ausbilden und damit die Effizienz bei der Stromgewinnung deutlich erhöhen. Sowohl das Elektrodenmaterial als auch die gleichmäßige Aufbringung (Aufdampfung) des Anodenkontaktes bedürfen einer gründlichen Untersuchung.

In Kooperation mit der lokalen Industrie und der Stadt Linz plant die physikalische Chemie der Kepler Universität Linz bis zum Sommer 1997 eine großflächige Plastiksolarzelle in Betrieb zu nehmen. Durch die Herstellung dieses Prototypen sollen die geeigneten Technologien adaptiert werden, um das Prinzip der Plastiksolarzelle der großtechnologischen industriellen Nutzung zuzuführen.

Literatur

1. Handbook of Polymers, Singapur Scientific (1997); S. Karg, W. Riess, V. Dyakonov, M. Schwoerer, Synth. Metals 54, 427 (1993); R. N. Marks, J. J. M. Halls, D. D. C. Bradley, R. H. Friend, A. B. Holmes, J. Phys. Condens. Matter 6, 1379 (1994)
2. J. Simon, J. J. Andre, Molecular Semiconductors, Springer Verlag (1985); G. A. Chamberlain, Solar Cells 8, 47 (1983); C. W. Tang, Appl. Phys. Lett. 48, 183 (1986)
3. N. S. Sariciftci, L. Smilowitz, A. J. Heeger and F. Wudl, Science 258, 1474 (1992); N. S. Sariciftci and A. J. Heeger, Intern. J. Mod. Phys. B 8, 237 (1994)
4. M. A. Fox, J. Wayne, E. Jones and D. M. Watkins, Chemical & Engineering News March 15, (1993)
5. G. Yu, C. Hummelen, F. Wudl and A. J. Heeger, Science 270, 1789 (1995)

*Dr. C. J. Brabec,
Physikalische Chemie der
Kepler Universität Linz,
A-4040 Linz, Altenbergerstr. 69,
Fax.: 0732/2468/770; E-Mail :
christoph.brabec@jk.uni-linz.ac.at*

*Prof. N. S. Sariciftci,
Vorstand der physikalischen
Chemie der Kepler Universität Linz,
A-4040 Linz, Altenbergerstr. 69,
Fax.: 0732/2468/770; E-Mail :
serdar.sariciftci@jk.uni-linz.ac.at*