

Perspektiven der Photovoltaik

Von Jürgen Parisi, Vladimir Dyakonov, Carsten Deibel und Ingo Riedel

Angesichts der globalen Problematik von Klimawandel und immer knapper werdenden Brennstoff-Ressourcen ist es eine zwingende Aufgabe der Forschung, alternative Formen der Energiegewinnung zu entwickeln. In der Abteilung Energie- und Halbleiterforschung (EHF) am Institut für Physik der Universität Oldenburg steht die Entwicklung, Effizienzsteigerung und Kostenreduktion von Technologien zur Stromgewinnung aus Wind und Sonne im Mittelpunkt der Arbeit. Dabei erfordern die komplexen Fragestellungen eine langfristige und interdisziplinäre Forschung, die sich von der Grundlagenphysik bis hin zur Übertragung in die industrielle Anwendung erstreckt. Ein enormes Potenzial besitzen neue Technologien der Solarenergie. Hauchdünne und hocheffiziente Materialien könnten in Zukunft einen großen Anteil des benötigten Energiebedarfs decken.

In the face of global climate change and the growing scarcity of fossile fuels, the international research community must develop alternative means of producing energy. In the Department of Energy and Semiconductor Research (EHF) (Institute of Physics) at the University of Oldenburg the work focusses on increasing efficiency and reducing costs of wind and solar electricity. The complex questions involved in this quest require long-term, interdisciplinary research, ranging from basic physical processes to the applications in industry. New solar technologies have enormous potential. Extremely thin and highly efficient materials could fill a large part of our energy needs in the future.



Abb. 1: Die Präparation und Verkapselung von Laborproben findet zur Vermeidung von Sauerstoff- und Luftfeuchtigkeitseinfluss in einer Inertgas-Atmosphäre statt (2-Kammer-Glove-Box-System).

Als die US-amerikanischen Bell-Labs vor 50 Jahren die erste Solarzelle öffentlich präsentierten, galt der Prototyp ihres Solar Energy Converting Apparatus noch als Kuriosum. Sechs Prozent des Sonnenlichts wandelte die neue Siliziumzelle in Strom um. Damit hatten ihre Entwickler Daryl Chapin, Calvin Fuller und Gerald Pearson zwar die Leistung aller anderen photoelektrischen Elemente deutlich übertroffen, doch abgesehen von ein paar Modellversuchen führte die Solarzelle zunächst ein Schattendasein. Erst mit der Raumfahrt und der Ölkrise wuchs das Interesse an der neuen Technologie.

Heute hat die Photovoltaik im Bereich der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Europa das höchste nachgewiesene technische Potenzial aller regenerativen Energiequellen. Nach dem aktuellen Gutachten des wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung zur Globalen Umweltveränderung (WBGU) werden in 50 Jahren rund 30 Prozent des Energieverbrauchs, bis zum Ende des Jahrhunderts sogar zwei Drittel des Energieverbrauchs mit Hilfe von Solarstrom und Solarwärme gedeckt werden.

Derzeit wird der Photovoltaik-Markt von Silizium-Solarzellen beherrscht. Die Suche nach besseren Materialien, höheren Wirkungsgraden und niedrigeren Fertigungskosten geht jedoch rasant weiter. Neuartige anorganische Dünnschicht-Solarzellen, Solarzellen auf organischer Basis (Kunststoff-/Polymer-Technologie) sowie Multispektralzellen und

Farbstofffilme stehen im Mittelpunkt der aktuellen Forschung. In unserer Arbeitsgruppe „Photovoltaik“ konzentrieren wir uns insbesondere auf Dünnschicht-Technologien mit organischen und anorganischen Materialverbindungen (Herstellung siehe Abb. 1).

Solarzellen aus Chalkopyriten

1998 wurde erstmals ein vielversprechender Kandidat für neue Photovoltaikanwendungen als kommerzielles Produkt angeboten: Dünnschicht-Solarzellen auf der Basis des Halbleitermaterials Kupfer-Indium-Diselenid (CuInSe_2 , kurz CIS). Dieses Chalkopyrit ist ein direkter Halbleiter, welcher trotz seiner polykristallinen Struktur eine hohe Absorption im Bereich des sichtbaren Lichtes aufweist. Die Dicke der Zelle beträgt daher nur etwa 0.001 Millimeter, weniger als ein Hundertstel der Dicke üblicher Silizium-Zellen.

Die heute zumeist verwendete Schichtstruktur ist in Abb. 2 angedeutet: Eine transparente Fensterschicht aus hochdotiertem ZnO , gefolgt von dünnen Pufferschichten aus $i\text{-ZnO}$ und CdS (für das inzwischen nichttoxische Alternativen verfügbar sind), sowie einer Absorberschicht aus Cu(In,Ga)(S,Se)_2 .

Wenn man bedenkt, dass dieser Solarzellentyp aus mehreren polykristallinen Halbleiterschichten mit mehr als zehn verschiedenen Atomspezies besteht, so erstaunt die hohe Energiewandlungseffizienz und gute Reproduzierbarkeit. Kleine Labor-Prototypen in der Größenordnung von einem Quadrat-

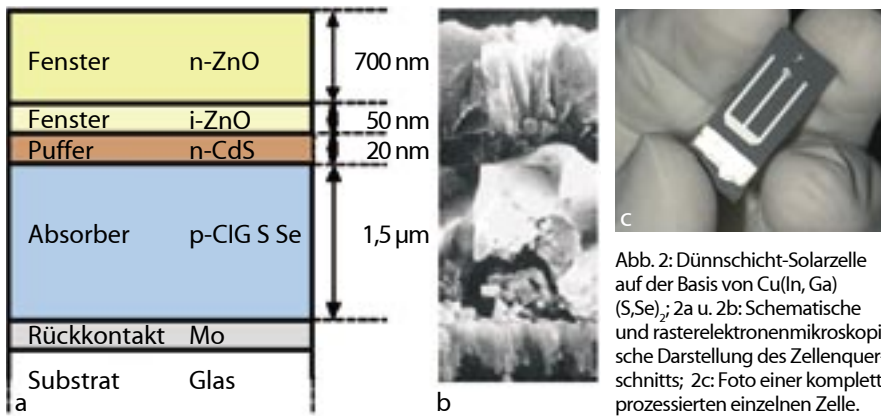


Abb. 2: Dünnschicht-Solarzelle auf der Basis von Cu(In, Ga) (S,Se)₂; 2a u. 2b: Schematische und rasterelektronenmikroskopische Darstellung des Zellenquerschnitts; 2c: Foto einer komplett prozessierten einzelnen Zelle.

zentimeter (Abb. 2c) erreichen zum Teil Rekordwirkungsgrade von 19 Prozent, größere Solarmodule mit einer Fläche von einem Quadratmeter immerhin noch Werte von bis zu 13 Prozent. Der Rekord bei Silizium-Solarzellen liegt derzeit für im Labor in aufwändiger Handarbeit gefertigte Solarzellen bei 24 Prozent. Die besten Solarzellen vom Fließband erreichen 19 Prozent, die daraus gebauten Module etwa 17 Prozent.

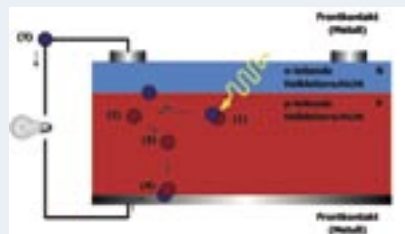
Der geringe Material- und Energieverbrauch bei der Herstellung von Dünnschicht-Zellen bietet beträchtliche Einsparpotenziale gegenüber der herkömmlichen Siliziumtechnologie. Zudem sind CIS-Solarzellen keiner lichtbedingten Alterung unterworfen. Allerdings muss auf eine sehr gute Feuchtigkeitsversiegelung geachtet werden, da Stabilitätsprobleme in heißer und feuchter Umgebung auftreten. Um die Solarzellen für den dauerhaften Einsatz zu wappnen, werden sie auf der Oberseite mit einer transparenten Deckschicht aus Glas oder Kunststoffolie verklebt (das sogenannte Verkapseln).

Auch wenn seit mehr als zwei Jahrzehnten intensiv an der CIS-Solarzelle geforscht wird, sind doch wesentliche physikalische Zusammenhänge nicht oder nur in Ansätzen verstanden. So ermöglichte dieses Material schon in der Anfangsphase überraschend hohe Wirkungsgrade. Das Forschungsinteresse galt daher zunächst der Technologie. Zum anderen stellte sich die Übertragung bekannter Methoden und Modelle aus der Festkörperphysik auf das sehr komplexe Materialsystem als schwierig heraus. Fest steht allerdings, dass das Wirkungsgradpotenzial auch im Vergleich zum realisierten Spitzenwirkungsgrad von 19 Prozent noch lange nicht ausgeschöpft ist. Es scheint daher durchaus lohnend, das physikalische Verständnis über dieses Material auf den gleichen Stand wie das technologische Wissen zu

bringen, um dadurch das mögliche Potenzial besser auszuschöpfen.

Eine entscheidende Rolle für elektronische Eigenschaften von Halbleitern spielen Verunreinigungen (sog. extrinsische Defekte) oder Fehler im Kristallgitter ohne die Einwirkung von Fremdatomen (sog. intrinsische Defekte). Diese Defekte können die elektrische Leitfähigkeit des Halbleiters sowohl verbessern, z.B.

Funktionsprinzip einer Solarzelle



Das Prinzip der Solarzellen beruht auf dem photoelektrischen Effekt, für dessen theoretische Erklärung Albert Einstein 1921 den Nobelpreis erhielt. Um aus Licht elektrische Energie zu erzeugen, werden Halbleitermaterialien wie Silizium, Cadmium-Tellurid oder Kupfer-Indium-Diselenid verwendet. Die kristalline Siliziumsolarzelle ist am weitesten verbreitet, 95 Prozent aller Solarzellen werden aus diesem Element hergestellt.

Halbleiter sind Stoffe, die unter Zufuhr von Licht oder Wärme elektrisch leitfähig werden, während sie bei tiefen Temperaturen isolierend wirken. Zur Herstellung einer Solarzelle wird das Halbleitermaterial „dotiert“. Damit ist das definierte Einbringen von chemischen Elementen gemeint, mit denen man entweder einen positiven Ladungsträgerüberschuss (p-leitende Halbleiterschicht) und damit Löcher im Elektronengitter oder einen negativen Ladungsträgerüberschuss (n-leitende Halbleiterschicht) im Halbleitermaterial erzielen kann. Werden zwei unterschiedlich dotierte Halbleiterschichten gebildet, entsteht an der Grenzschicht ein sogenannter p-n-Übergang. Über die Grenzschicht tauschen beide Halbleiter Elektronen aus, durch den Fluss von Elektronen

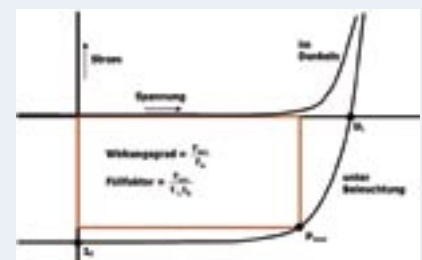
als zusätzliche Dotierung wie in herkömmlichen Si-Solarzellen, aber auch verschlechtern, indem sie als Rekombinationszentren für die freigesetzten Ladungsträger wirken. Derartige Defekte beeinflussen direkt den Wirkungsgrad. Zur Optimierung des Wirkungsgrades bei Solarzellen ist es daher essenziell, Defekte mit physikalischen Methoden zu detektieren, zu lokalisieren und ihre physikalische Ursache zu erkennen. Nur dann kann man den Herstellungsprozess so beeinflussen, dass die Defekte entweder vermieden oder gezielt zur Verbesserung der Solarzelle erzeugt werden.

In Oldenburg versuchen wir dieser Herausforderung durch die Anwendung verschiedener sogenannter defektspektroskopischer Methoden auf Testzellen, insbesondere der Admittanz-Spektroskopie und der transienten Störstellen-Spektroskopie (DLTS: Deep Level Transient Spectroscopy), zu begegnen. Die spektroskopischen Messverfahren können einerseits zum heutigen physikalischen Verständnis von CIS-Solarzellen beitragen, sie könnten andererseits aber auch in Zukunft zur Qualitätskontrolle während der Her-

von der n- zur p-Schicht entsteht eine elektrische Spannung.

Das Licht erzeugt eine positive und eine negative Ladung in der p-leitenden Halbleiterschicht. Die Ladungen diffundieren im p-Gebiet. Nur wenn die negative Ladung die p-n-Grenzschicht erreicht, kann sie das p-Gebiet verlassen. Ein Strom fließt, wenn die negative Ladung den Frontkontakt erreicht hat.

Die Strom-Spannungs-Kennlinie (unten) stellt das charakteristische Verhalten einer Solarzelle dar. Dabei wird der Solarzellenstrom über der angelegten Spannung aufgetragen. Aus der Kennlinie können die wichtigsten Solarzellenkenngrößen bestimmt werden: Füllfaktor, Kurzschlussstrom und Wirkungsgrad. Der Füllfaktor ist ein Maß dafür, wie gut eine Solarzelle in der Lage ist, die durch Licht erzeugten Ladungsträger zu sammeln. Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis zwischen der abgegebenen elektrischen Leistung und der eingestrahlten Leistung. Der Kurzschlussstrom ist der Strom, den eine Solarzelle liefert, wenn beide Klemmen ohne jeden zusätzlichen Widerstand verbunden werden (Kurzschluss).



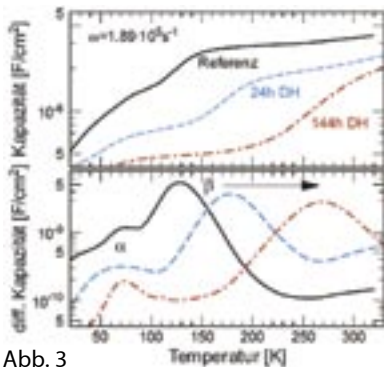


Abb. 3

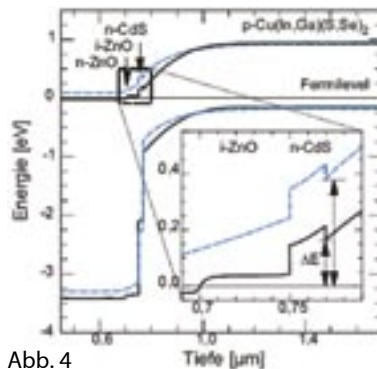


Abb. 4

Abb. 3: Kapazitätsspektrum (oben) und nach der Wechselspannungsfrequenz abgeleitetes Kapazitätsspektrum von $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ -basierten Dünnschicht-Solarzellen (Referenzprobe und zwei für 24 bzw. 144 Stunden dem „Damp-Heat“-Test ausgesetzte Proben) in Abhängigkeit von der Temperatur. Der Defektzustand verschiebt sich proportional zur Zeitdauer des „Damp-Heat“-Tests, was einer Vergrößerung der Aktivierungsenergie entspricht.

Abb. 4: Banddiagramm der $\text{ZnO}/i\text{-ZnO}/\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ -Heterostruktur. Der Ausschnitt zeigt die Anordnung der Energiebänder an der Grenzfläche $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$. Die durchgezogenen zwei Linien repräsentieren das Leitungs- und Valenzband einer Referenzprobe. Die gestrichelten Linien zeigen einen Fall, wo die Aktivierungsenergie E des Defektzustands vergrößert ist, wie dies auch beim „Damp-Heat“-Test geschieht.

stellung der Solarzellen eingesetzt werden. Beide Methoden sind kapazitive Techniken, die den Umstand nutzen, dass Störstellen im Halbleiter je nach Besetzung unterschiedliche Ladungszustände haben können und so zur Kapazität der Probe beitragen. Während bei der Admittanz-Spektroskopie die stationäre Kapazität gemessen wird - ein kleines Wechselspannungssignal wird an den Halbleiter angelegt und die resultierende Kapazität gemessen -, wird bei DLTS der zeitliche Verlauf des Anstiegs bzw. Abfalls der Kapazität nach einem Spannungs- oder Lichtimpuls gemessen. Die Kombination beider Methoden gestattet eine systematische Analyse der elektrisch aktiven Zustände in $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ -basierten Dünnschicht-Solarzellen.

Unser Forschungsinteresse galt in jüngster Vergangenheit dem Einfluss „beschleunigter Lebensdauer-Tests“ auf die Stabilität von $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ -Solarzellen. Die Langzeitstabilität unter Umweltbedingungen ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für den Erfolg von Solarzellen als wettbewerbsfähige Quelle erneuerbarer Energien. Wie bereits erwähnt, sind die heute auf dem Markt befindlichen Solarmodule gekapselt, um eine feuchtigkeitsbedingte Alterung zu verhindern. Um einen Einblick in die mit der Alterung verbundenen Verlustmechanismen zu erhalten - letztlich könnte dadurch der Verkapselungsprozess vereinfacht werden -, untersuchen wir die Stabilität von ungekapselten Solarzellen im Zeitrafferverfahren.

Die Experimente zur künstlichen Alterung werden anhand des „Damp-Heat“-Tests durchgeführt. Die ungekapselten Zellen werden in Klima-Kammern für bis zu 1.000 Stunden einer feucht-heißen Luft (85°C Temperatur, 85 Prozent relative Luftfeuchtigkeit) ausgesetzt. Wir charakterisieren die Solarzellen wieder mittels Admittanz-Spektroskopie und transienter Störstellenspektroskopie. Eine möglichst umfassende Analyse gelingt, wenn die Untersuchungen in Abhängigkeit

der Temperatur durchgeführt werden. Die Probentemperatur wird dabei kontinuierlich von ca. -240°C bis $+80^\circ\text{C}$ variiert.

Proben, die solchen extremen Bedingungen ausgesetzt waren, zeigen eine geringere Leerlaufspannung und kleinere Füllfaktoren. Die kapazitive Defektspektroskopie zeigt eindeutig: die verschiedenen beobachteten Störstellen im Material veränderten sich. Die Aktivierungsenergie der Störstellen zeigt eine irreversible Verschiebung hin zu tieferen Energien (Abb. 3 u. 4). Die erhöhte Aktivierungsenergie resultiert aus einer Verminderung der Bandverbiegung an der Oberfläche des $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ -Absorbers, was sich in der verminderten Leerlaufspannung zeigt, die wiederum zu einer merklich verringerten Energieumwandlungs-Effizienz der Zelle führt.

Durch die Untersuchungen kommt klar zum Ausdruck, dass vor allem bei DLTS der direkten Messung des zeitlichen Verlaufs der Kapazität an $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ -Materialien bisher zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Zumal die experimentell beobachteten Zusammenhänge oftmals wesentlich komplexer sind, als dies mit den üblicherweise verwendeten Standardverfahren erfasst werden kann. Eine jüngst von uns entwickelte Messapparatur für transiente Störstellenspektroskopie eröffnet neue Möglichkeiten zur Analyse von Chalkopyrit-Halbleitern.

Solarzellen aus Kunststoff

Doch für die Zukunft der Photovoltaik gelten nicht nur Solarzellen auf der Basis von Chalkopyriten als vielversprechendes Konzept. In unserer Oldenburger Arbeitsgruppe forschen wir an einem Stoff, der bald der neue Renner in Sachen Photovoltaik werden könnte: Eine Kunststoff-Solarzelle aus einer Mischung von Kohlenwasserstoff-Verbindungen - genau genommen aus sogenannten konjugierten Polymeren und Fullerenen, die die Photosynthese der Pflanzen nachahmen. Polymere kennt man aus der Küche: Frisch-

haltefolien und Verpackungen bestehen aus Polymeren, die aber nicht lichtempfindlich sind, wie ihre Verwandten aus den organischen Solarzellen. Diese in den 1990er Jahren neu entdeckten Materialien vereinigen die elektrischen und optischen Eigenschaften der bisher eingesetzten anorganischen Halbleiter mit den Vorteilen von Kunststoffen. Mit dieser zukunftssträchtigen Technologie könnten in großem Maßstab schnell und kostengünstig flexible Solarzellen beliebiger Form entstehen, die zudem ohne Bedenken wieder entsorgt werden könnten.

Dabei ist die Herstellung überraschend einfach: Das Rohmaterial wird in Lösungsmitteln aufgelöst - die rote Flüssigkeit enthält bereits alle Bestandteile, die für die lichtempfindliche Schicht der Solarzelle nötig sind. So kann auf aufwändige Schmelzverfahren verzichtet werden, wie sie für die Herstellung herkömmlicher Solarzellen üblich sind. Als Substrat verwenden wir Glasscheiben, die mit einer dünnen Fensterelektrode aus Indium-Zinn-Oxid beschichtet sind. Durch ein konventionelles Aufschleuderverfahren wird ein hochleitfähiges Polymer als elektrisch leitfähige Zwischenschicht aufgetragen. Anschließend scheiden wir auf gleiche Weise das Polymer-Fulleren-Gemisch aus der Lösung als Dünnschicht ab. Dabei wird auf einer schnelllaufenden Drehspindel das Trägergläschen beschleunigt und die überschüssige Lösung weggeschleudert. Übrig bleibt eine gleichmäßige, fast durchsichtige Schicht von nur 100 Nanometern Dicke. Für großflächige Anwendungen könnten in diesem Schritt auch problemlos Siebdrucktechniken zum Einsatz kommen. Die Metallkathode aus Aluminium wird derzeit noch in einer Vakuum-Kammer thermisch aufgedampft, wobei ihr Ersatz durch druckbare Elektroden durchaus denkbar ist.

Grundlage von organischen Solarzellen sind also konjugierte Polymere, Kunststoffe mit halbleitenden Eigenschaften. Wieso leitet aber ausgerechnet ein Kunststoff den elektrischen Strom? In Polymeren alterniert die

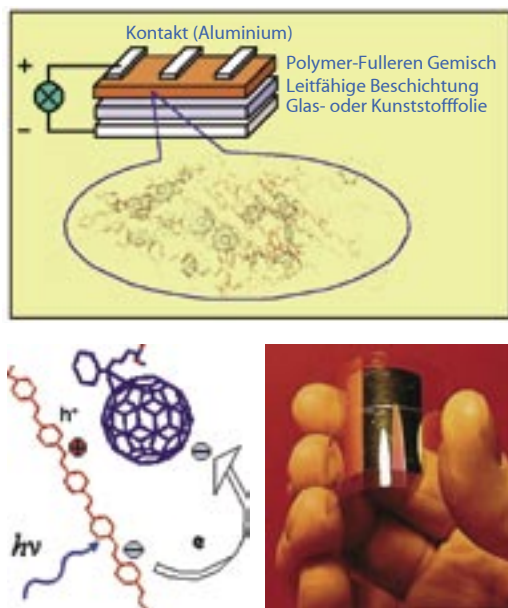


Abb. 5: Aufbau und Funktionsprinzip einer organischen Solarzelle aus konjugierten Polymeren (oben und unten links); Solarzellen auf Polymerbasis lassen sich prinzipiell auf flexiblen Substraten (hier: PET-Folie mit leitfähiger Beschichtung) aufbauen (unten rechts).

Abfolge von Einfach- und Doppelbindungen zwischen den Kohlenstoffatomen. Erst durch diesen „konjugierten“ Aufbau erhalten Polymere die für klassische Halbleiter typischen Eigenschaften. Um den gewünschten photovoltaischen Effekt erzielen bzw. die dafür erforderliche Ladungstrennung stimulieren zu können, wird eine weitere Materialkomponente benötigt. Im Labor schleusen wir

Kooperationspartner

Kooperationspartner im Bereich anorganische Photovoltaik sind das Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal, das Hahn-Meitner-Institut in Berlin, das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg in Stuttgart, das Institut für Physikalische Elektronik an der Universität Stuttgart, das Physikalische Institut an der Universität Würzburg, das Institut für Materialwissenschaften an der Universität Erlangen-Nürnberg, das Institut für Materialwissenschaften an der Technischen Universität Darmstadt und die Shell Solar GmbH in München. Im Bereich organische Photovoltaik arbeiten wir mit dem Linzer Institut für Organische Solarzellen, dem Hahn-Meitner-Institut in Berlin, dem Freiburger Materialforschungszentrum, dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg, der Siemens AG in Erlangen, dem Institut für Angewandte Photophysik an der Technischen Universität Dresden und dem Institut für Molekulare Elektronik an der Universität Groningen zusammen.

hierfür fußballförmige Kugeln aus Kohlenstoffatomen (Fullerene) in die Polymerstruktur ein (Abb. 1). Dadurch erhält man einen Elektronenlieferanten, das Polymer, und einen Elektroneneinfänger, das Fullerene. Trifft ein Lichtteilchen auf das konjugierte Polymer, nimmt dieses die Energie des Lichtes auf und gibt sie anschließend in Form eines Elektrons an das Fullerene ab. Danach wandert das Elektron zu einer Metallelektrode. Sonnenenergie ist also in elektrische Energie umgewandelt worden (Abb. 5).

Natürlich kommt es auf die ideale Stoffmischung an. Ein hoher Wirkungsgrad der Zelle kann nur dann erreicht werden, wenn die Elektronen leicht vom Polymer auf das Fullerene „hüpfen“ und die Strecke zur Elektrode möglichst schnell durchwandern. Speziell in unserer Arbeitsgruppe werden verschiedene Kombinationen aus Polymer und Fullerene mit dem Ziel erforscht, eine möglichst hohe Energieeffizienz zu erreichen.

So werden im Labor bereits organische Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von über drei Prozent realisiert und getestet. Als wirtschaftlich interessant gilt derzeit eine Energieausbeute von mehr als fünf Prozent. Dieses Ziel wollen wir im Rahmen verschiedener Verbundprojekte, die im Wesentlichen von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Europäischen Union (EU) gefördert werden, bereits in den kommenden Jahren erreichen.

Außerdem arbeiten wir an einem Konzept für die Herstellung von flexiblen Solarfolien (Abb. 5). Das photoaktive Material wird auf eine flexible Trägersubstanz aus Kunststoff aufgebracht, und auch das Anodenmaterial soll in Zukunft aus einer leitenden Kunststoffschicht gefertigt werden. Ziel ist letztlich die Produktion eines nahezu durchsichtigen Materials, das in langen Bahnen auf Rollen aufgewickelt an eine gigantische Frischhaltefolie erinnert. Natürlich bedarf es dazu der tatkräftigen Unterstützung der Vielzahl beteiligter Partnerinstitute und Universitäten (s. Kasten).

Wir sind mehr als optimistisch, dass wir die Effizienz und Lebensdauer von organischen Solarzellen bis auf ein marktwirtschaftlich lohnendes Niveau steigern können. In diesem Rahmen kommt auch einem von der EU finanzierten Forschungsvorhaben, das von uns koordiniert wird, eine besondere Rolle zu.

Gemeinsam arbeiten wir mit WissenschaftlerInnen aus Österreich, Italien, Spanien, Belgien und Deutschland an photovoltaischen Materialien, die einerseits das Spektrum des Sonnenlichtes effizienter nutzen als bisher und die andererseits auch das technologische Potenzial besitzen, um längerfristig industriell eingesetzt zu werden. Natürlich liegt zwischen den ersten Laborzellen bis hin etwa zur großflächigen Anwendung von flexiblen Solarfolien noch ein großer Schritt. Einsatzgebiete werden zunächst Kleingeräte und Chipkarten sein. So ist vorstellbar, dass Leuchtanzeigen an Elektrogeräten mit fotoaktiven Kunststoffzellen versorgt und der Stromverbrauch auf diese Weise reduziert werden könnte. Sogar großflächige Fassaden- und Fensterbeschichtungen zur Stromgewinnung oder Spezialkleidung aus organischen Solarzellen rücken damit in den Bereich des Möglichen, allerdings wird die Realisierung derartiger Produkte wohl noch eine Weile auf sich warten lassen.

Die Autoren



Prof. Dr. Jürgen Parisi (l.), Leiter der Abteilung Energie- und Halbleiterforschung (EHF) am Institut für Physik, wurde 1995 nach Oldenburg berufen. Vorher war er Professor an den Universitäten Bayreuth und Zürich. Die Forschungsaktivitäten seiner Arbeitsgruppe reichen von den physikalischen Grundlagen kondensierter Materie bis hin zu technischen Anwendungen regenerativer Energiesysteme.

PD Dr. Vladimir Dyakonov (2.v.l.) ist seit 1998 Leiter der Arbeitsgruppe Photovoltaik innerhalb der Abteilung EHF am Institut für Physik. Nach der Promotion in Sankt Petersburg habilitierte er sich nach Forschungsaufenthalten in Bayreuth, Antwerpen und Linz an der Universität Oldenburg.

Dr. Carsten Deibel (2.v.r.) studierte Physik an den Universitäten Bochum und Sussex (England) und promovierte an der Universität Oldenburg. Er ist seither Postdoktorand am Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC) in Leuven (Belgien).

Dipl.-Physiker Ingo Riedel (r.) studierte an der Universität Oldenburg und promoviert seit 2001 in der Abteilung EHF.

Der Beitrag ist unter Mitarbeit der Dipl.-Umweltwissenschaftlerin Susanne Adam (Institut für Chemie und Biologie des Meeres der Universität Oldenburg) entstanden.