

# Strategien zur kostengünstigen Massenfertigung organischer Photovoltaik

## Einführung

Ungefähr 90 Prozent der auf dem Markt befindlichen Solarmodule sind aus Silizium gefertigt, während der verbleibende Anteil von Dünnschichttechnologien und Multibandsystemen eingenommen wird. Eine Vielzahl netzferner Anwendungsbereiche von Solarzellen benötigen nicht so sehr lange Lebensdauern als vielmehr eine signifikant reduzierte Kostenstruktur. Dies gilt zum Beispiel für die Versorgung von mobilen Kleinverbrauchern mit kurzen Produktzyklen. Die Erforschung neuer Photovoltaik-Konzepte eröffnet neue Möglichkeiten zur Senkung der Herstellungskosten und der Erschließung neuer Anwendungsbereiche.

Vor diesem Hintergrund stellt der Einsatz organischer Halbleiter in der Photovoltaik einen viel versprechenden Ansatz dar. Diese neuartigen Funktionsmaterialien vereinen wesentliche Eigenschaften konventioneller Halbleiter mit attraktiven Eigenschaften wie mechanische Flexibilität und Transluzenz. Organische Halbleiter, wie z. B. konjugierte Polymere und Moleküle, lassen sich mit Hilfe einfacher Druck- und Filmziehverfahren oder Vakuumsublimation zu großflächigen, hauchdünnen Schichten (ca. 1/100 der Dicke eines Haares) auf flexiblen Trägerfolien verarbeiten. Entsprechend kostengünstig können die hochabsorbierenden organischen Funktionsmaterialien zu flexiblen und sehr leichten Solarmodulen verarbeitet werden, welche nahezu an jede beliebige Oberfläche angepasst werden können.

In den vergangenen 10 Jahren profitierte die organische Photovoltaik (OPV) von den enormen Fortschritten der organischen Elektronik, der Entwicklung von Feldeffekttransistoren (OFETs) sowie der Leuchtdioden (OLEDs). Das Fachgebiet der OPV hat sich heute, stimuliert durch öffentliche Fördermaßnahmen, international zu einer eigenständigen Disziplin innerhalb der Photovoltaik entwickelt. Die durch Grundlagen-

forschung und Entwicklungsarbeiten erzielten Erfolge haben schließlich die Industrie für dieses Thema aufmerksam gemacht. Im gegenwärtigen Entwicklungsstand der organischen Photovoltaik sind allerdings noch immer fundamentale Fragestellungen zu lösen. Dieser Aufgabe widmen sich die Mitgliedsinstitute des Forschungsverbands Sonnenenergie wie das ZAE in Würzburg, das HMI in Berlin, das ZSW in Stuttgart und das Fraunhofer ISE in Freiburg, welche die Grundlagenforschung und Entwicklung im Bereich OPV in Deutschland entscheidend mitgeprägt haben. Trotz des in Bezug auf Wirkungsgrad und Lebensdauer noch nicht voll ausgereiften Entwicklungsstands der organischen Photovoltaik werden bereits in enger Zusammenarbeit mit der Industrie konkrete Ansätze zur industriellen Fertigung kostengünstiger, organischer PV-Systeme evaluiert.

## Funktionsweise organischer Solarzellen

Für die Erzeugung von Elektrizität nutzen organische Solarzellen einen Prozess, der ähnlich wie in der Photosynthese die Strahlungsenergie des Sonnenlichts in chemische Energie umwandelt. Dieser Mechanismus kann durch eine geeignete Kombination stark absorbierender Chromophore (z. B. halbleitende organische Moleküle oder Polymere) und starker Elektronenakzeptoren (z. B. Fullerene) für die photovoltaische Erzeugung von Ladungsträgern genutzt werden.

Durch die Absorption von Licht in einem stark absorbierenden Elektronendonator (D) werden im Molekül positive und negative Ladungen erzeugt. Diese werden an Grenzflächen zum Akzeptormolekül (A) mit hoher Effizienz räumlich getrennt (*Abb. 1*). Um diesen Mechanismus in organischen Solarzellen effizient nutzen zu können, muss eine hohe Ausbeute an freien Ladungsträgern garantiert werden. Statt eines

Dr. Ingo Riedel  
ZAE Bayern  
jetzt:  
Universität Oldenburg  
Ingo.Riedel@uni-oldenburg.de

Prof. Dr. Vladimir Dyakonov  
ZAE Bayern  
dyakonov@zae.uni-wuerzburg.de

Thomas Kolbusch  
Solarcoating Machinery  
info@solarcoating.de

Dr. Christoph J. Brabec  
Konarka Germany  
cbrabec@konarka.com

Michael Niggemann  
Fraunhofer ISE  
michael.niggemann@ise.fraunhofer.de

Dr. Martin Pfeiffer  
Heliatek  
martin.pfeiffer@heliatek.com

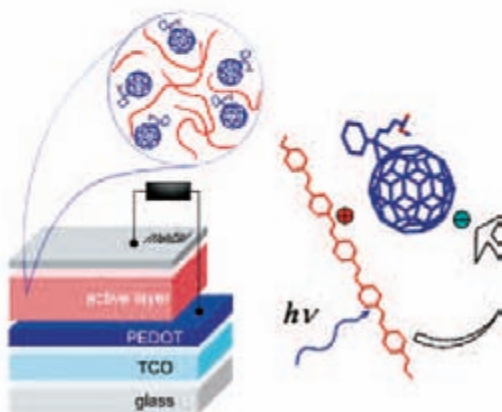
Dr. Kosta Fostiropoulos  
HMI  
fostiropoulos@hmi.de

Dr. Erik Ahlswede  
ZSW  
erik.ahlswede@zsw-bw.de

Abbildung 1  
Oben: Flexible  
Polymersolarzelle auf  
PET-Folie.



Unten: Schematischer  
Aufbau einer  
organischen Solarzelle  
mit Volumen-Misch-  
absorber. Rechts:  
Lichtinduzierte  
Ladungstrennung an  
der Grenzfläche  
zwischen Elektronen-  
donator (Polymer) und  
-akzeptor (Fulleren)



konventionellen planaren Heteroübergangs – wie in Siliziumsolarzellen üblich – wird für die Absorberschicht organischer Solarzellen ein Volumenheterogemisch<sup>1</sup> der komplementären Halbleiter verwendet, um eine hinreichend hohe Dichte an D-A Grenzflächen zu erreichen. Im einfachsten Fall so genannter BHJ-Solarzellen werden die gegenüberliegenden Seiten der Absorberschicht durch eine transparente, elektrisch leitfähige Fensterelektrode (TCO – Transparent Conducting Oxide) und ein geeignetes Metall kontaktiert.

Diese für positive und negative Ladungsträger selektiven Kontakte erzeugen in der Absorberschicht ein internes elektrisches Feld, welches für die jeweiligen Ladungsträger einen entgegengesetzt gerichteten Transport und damit die prinzipielle Funktion der Solarzelle ermöglicht. In der organischen Photovoltaik haben sich bislang zwei Materialklassen bewährt, welche sich hinsichtlich ihrer Verarbeitung zu dünnen Halbleiterschichten unterscheiden:

- Verflüssigbare konjugierte Polymere und Moleküle lassen sich durch einfache Beschichtungsverfahren zu homogenen (ungeordneten) Dünnschichten auf großen Flächen verarbeiten.
- Unlösliche molekulare Halbleiter werden durch Sublimation in vakuumgestützten Prozessen zu geordneten Dünnschichten prozessiert.

Beide Herstellungsansätze<sup>2</sup> bieten ein vergleichbares Potenzial zur Erreichung hoher Wirkungsgrade (aktuell: 5–6%), haben jedoch spezifische Vor- und Nachteile in Bezug auf die Realisierung komplexer Solarzellenarchitekturen, strukturierte Halbleiterabscheidung und die erforderliche Produktionstechnologie für die künftige Massenfertigung.

## Anforderungsprofil für die organische Photovoltaik

Die organische Photovoltaik (OPV) kann nur schwerlich mit konventionellen Technologien konkurrieren in Bezug auf den Wirkungsgrad (maximal möglicher Wirkungsgrad: >10%) und die Langzeitstabilität (bisher >1000 h). Zukünftige Anwendungen beziehen sich daher auf netzferne Applikationen im Bereich des täglichen Lebens (z. B. Integration in Konsumprodukte). In diesem breiten Anwendungsbereich kann die OPV durch den geringen Materialeinsatz und eine kostensparende Produktionstechnologie für flexible Solarmodule eine klare Führungsposition einnehmen. Um dieses Ziel zu erreichen, arbeiten neben den FVS-Mitgliedsinstituten weitere Forschungseinrichtungen, Universitäten und Industrieunternehmen an effizienten und hinreichend langzeitstabilen Technologien für organische Solarzellen.

Für die Markteinführung müssen die Zellwirkungsgrade organischer Solarzellen jedoch auf mindestens 10% (z. B. in Tandemstrukturen) und ihre Langzeitstabilität auf mindestens 3-5 Jahre gesteigert werden. Die bisher erzielten Erfolge und die Dynamik der Entwicklung innerhalb der vergangenen 5 Jahre zeigen, dass die Kriterien der Markteinführung schon bald erreicht werden können. Bereits heute arbeitet die Forschung gemeinsam mit der Industrie an innovativen In-line-Produktionskonzepten zur kostengünstigen Massenfertigung organischer Solarzellen.

<sup>1</sup> Englisch: bulk-heterojunction (BHJ)

<sup>2</sup> Beide Herstellungsverfahren werden von den FVS-Mitgliedsinstituten erforscht: **VakuumsUBLimierte Solarzellen:** HMI; **Flüssig prozessierte Solarzellen:** Fraunhofer ISE, ZAE Bayern, ZSW

## Industrielle Produktionstechnologien für organische Solarzellen

Eine Vielzahl kleinerer organischer Moleküle und Pigmente, die für organische Solarzellen verwendet werden, können nicht in einem Lösungsmittel verflüssigt werden, sondern sie werden im Labormaßstab durch thermisches Verdampfen im Hochvakuum oder durch organische Gasphasenabscheidung (OVPD) zu geordneten Schichten verarbeitet. Die Herstellung der für die Solarzelle erforderlichen BHJ-Mischabsorberschichten erfolgt daher durch gleichzeitiges Verdampfen von Donator und Akzeptormaterialien mit gezielt eingestellten Depositionsraten. Dagegen können makromolekulare oder entsprechend funktionalisierte organische Halbleiter in einem Lösungsmittel gemeinsam verflüssigt und mit Hilfe kostengünstiger Beschichtungstechniken (Spin-Coating, Filmzieh- oder Druckverfahren) großflächig auf ein Substrat aufgebracht werden (Abb. 2 unten). Für den industriellen Produktionsmaßstab sind für beide Ansätze viel versprechende Verfahren entwickelt worden, welche gegenwärtig noch hinsichtlich produktionsrelevanter Aspekte untersucht werden.

### Das OVPD-Verfahren

Das HMI betreibt neben der konventionellen Beschichtung im Ultrahochvakuum (UHV) zusammen mit der AIXTRON AG ein alternatives Verfahren auf Basis der in-line-fähigen OVPD®-Technologie zur Herstellung organischer Solarzellen. In diesem Verfahren werden die organischen Materialien im Vakuum aus externen, beheizten Quellen verdampft und mittels eines inerten Trägergases zum Substrat transportiert, wo sie separat oder simultan abgeschieden werden. Diese Technologie zeichnet sich durch eine exakte Prozesskontrolle und eine hohe Reproduzierbarkeit bei geringen Betriebskosten aus. OVPD erlaubt darüber hinaus die Herstellung sequentieller Schichtabfolgen zum Beispiel für organische Tandemsolarzellen. Die am HMI installierte OVPD-Anlage wird in Pilotversuchen hinsichtlich Durchsatz und Größe von Modulen, sowie Materialeffizienz und Schichtqualität evaluiert. Mit dem OVPD-Prozess konnten

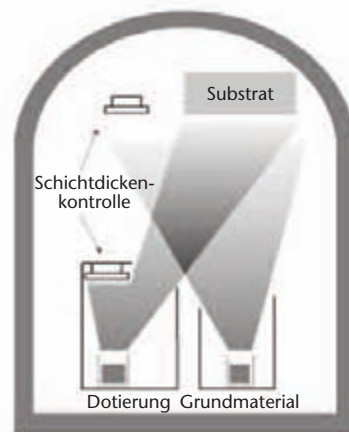


Abbildung 2  
Oben: Prinzip der Vakuumsublimation organischer Moleküle. Der lichtabsorbierende Halbleiter wird im Ultrahochvakuum in einer thermischen Verdampferquelle in die Gasphase überführt und kondensiert an der Oberfläche des Substrates.

Unten: Tintenstrahldrucker zur strukturierter Abscheidung verflüssigter Halbleitersysteme (ZAE Bayern)

bereits erste monolithisch aufgebaute, d. h. intern serienschaltete Module hergestellt werden. Die bisher erzielten Effizienzen sind mit bisher 1-2 % zwar noch gering, aber es besteht ein hohes Optimierungspotenzial in Bezug auf die Prozessführung, den Zellaufbau und die verwendeten Materialien. Diese Aspekte sollen in künftigen Folgeprojekten bearbeitet werden.

Die zur OVPD alternative und bereits weiter entwickelte Beschichtungstechnologie nutzt den Prozess der Vakuumsublimation organischer Moleküle auf geeigneten Substraten: Die organischen Halbleiter werden im Hochvakuum ( $10^{-8} \dots 10^{-6}$  mbar) durch temperaturgeregelte Verdampfung bei Quellentemperaturen zwischen 120 und 500 °C zu definierten Dünnschichten abgeschieden (Abb. 2). Das Substrat wird dabei typischerweise bei Raumtemperatur gehalten, was einerseits für die Taktzeit zukünftiger Fertigungsanlagen von Vorteil ist und andererseits die Verwendung von kostengünstigen und flexiblen Polymersubstraten ermöglicht. Die Dotierung von Halbleiter- und Halbleitermischschichten erfolgt durch kontrollierte Co-Verdampfung unterschiedlicher Materialien aus mehreren Quellen. Die Dotierkonzentration

Abbildung 3  
OVPE-Beschichtungs-  
anlage am HMI



In-line-Beschichtungs-  
anlage am Fraunhofer  
IPMS in Dresden in  
Zusammenarbeit mit  
der Firma Heliatek  
GmbH



wird dabei durch eine präzise Ratenkontrolle sichergestellt. Für Forschungszwecke wird dieses Verfahren im Labormaßstab am HMI und dem Institut für angewandte Photophysik der TU Dresden betrieben. Die Firma Heliatek GmbH evaluiert gegenwärtig eine auf diesem Verfahren basierende In-line-Beschichtungsanlage zur Herstellung organischer Solarzellen und -module auf großen Flächen (Abb. 3). Es konnte bereits gezeigt werden, dass das Verfahren hohe Schichtwachstumsraten bei gleichzeitig hoher Materialeffizienz (>60%) und sehr gute Schichthomogenitäten (<3%) auf 30x40 cm<sup>2</sup>-Substraten ermöglicht. Damit sind bereits wesentliche Anforderungen für eine industrielle Fertigung vakuumprozessierter organischer PV-Systeme in diskontinuierlichen Herstellungsprozessen erfüllt worden.

#### **Druck und Filmziehverfahren für R2R-Beschichtungsanlagen zur Herstellung von Polymersolarzellen**

Die Funktionsschichten polymerbasierter Solarzellen werden im Gegensatz zu vakuumprozessierten Systemen aus der Flüssigphase herge-

stellt. Hierzu können verschiedene großflächige Beschichtungstechniken, wie zum Beispiel Druck- und Filmziehverfahren, zum Einsatz kommen, welche insbesondere eine ausgezeichnete Kompatibilität zu kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle (R2R) Prozessen anbieten. Der hohe Flächendurchsatz in derartigen betriebenen R2R-Beschichtungsanlagen, sowie die materialersparende Anwendung verflüssigter Halbleiter bietet ein außerordentlich hohes Potenzial für die kostengünstige Massenfertigung flexibler und großflächiger Solarmodule.

Neben der eigentlichen Halbleiternaufbringung lassen sich alle für die Modulherstellung relevanten Prozessschritte (Trocknung der Funktionsschichten, Metallisierung, Packaging) in ein R2R-Schema implementieren, wodurch weitere Kostensenkungspotenziale erkennbar werden. Die Firma Solar Coating Machinery konzentriert sich auf die Konzeption modular aufgebauter Produktionsanlagen für flexible PV-Systeme und hat bereits alle für die Herstellung polymerer Solarzellen erforderlichen Produktionseinheiten realisieren können. Die Firma bietet bereits R2R-Produktionsstraßen für flexible, farbstoffsensibilisierte Solarmodule (DSSC) zum Verkauf an. Eine Pilotanlage für die Demonstration der R2R-Produktion flexibler organischer Solarzellen (Polymer, farbstoffsensibilisierte Solarzellen) wird gegenwärtig in Dormagen aufgebaut.

## **Ausblick**

Die organische Photovoltaik, welche noch vor 10 Jahren in den „Kinderschuhen“ steckte, hat sich heute zu einer aussichtsreichen PV-Technologie für Applikationen im low-cost-Bereich entwickelt. Wirkungsgrade von über 5 % und Lebensdauern von bereits einigen Monaten stützen die Erwartung, dass die organische Photovoltaik bereits in einigen Jahren den Meilenstein der Markteinführung erreichen wird. Um das Ziel der Kommerzialisierung mittelfristig erreichen zu können, ist künftig eine enge Verknüpfung interdisziplinärer Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Entwicklungsarbeit sowie eine fruchtbare Zusammenarbeit mit der Industrie erforderlich.

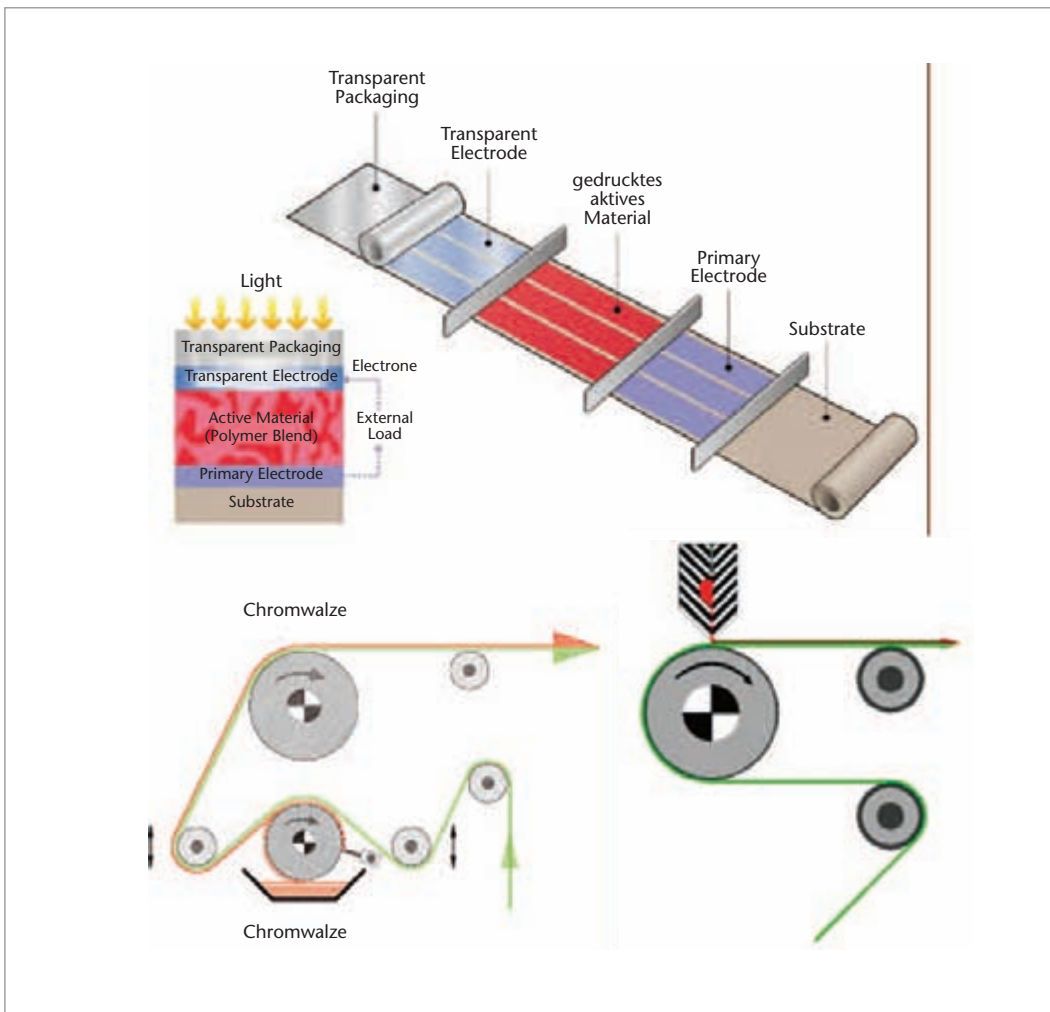


Abbildung 4  
Oben: Schema eines kontinuierlichen Fertigungsprozesses für Polymersolarzellen (Konarka Germany GmbH).

Unten: Zwei Beschichtungstechniken für eine In-line-Rolle-zu-Rolle-Fertigungsstraße organischer Solarmodule auf Basis flüssigprozessierbarer Halbleiter (Solar Coating Machinery GmbH)

Die FVS-Mitgliedsinstitute tragen durch ihre langjährige Forschungstätigkeit im Bereich der organischen Photovoltaik zum Erreichen dieses Ziels maßgeblich bei. Öffentliche Fördermaßnahmen der DFG und des BMBF spielen dabei eine wichtige Rolle, um einerseits die Finanzierung der Grundlagenforschung zu unterstützen und andererseits, um die Verknüpfung interdisziplinärer Wissenschaft und Industrie in Deutschland zu fördern. Die bereits erzielten Erfolge und die rasche Entwicklung des Gebietes innerhalb der vergangenen fünf Jahre geben Grund zur Hoffnung, dass die Markteinführung der organischen Photovoltaik schon kurzfristig erreicht werden kann.