

# ■ Produktionstechnologien für Dünnschicht-Photovoltaik

- Produktionstechnologie für die Photovoltaik
- Von der Grundlagenforschung zur Produktion – Entwicklungspotenziale der Dünnschichtphotovoltaik an Beispielen aus der Si- und CIS-Technologie
- Prozessentwicklung für industrielle Pilotierung von Dünnschichttechnologien
- Strategien zur kostengünstigen Massenfertigung organischer Photovoltaik

# Produktionstechnologien für die Photovoltaik

Robin Schild  
VON ARDENNE  
schild.robin@vonardenne.biz

Martin Dimer  
VON ARDENNE  
Dimer.martin@ardenne-at.de

Dr. Michael Powalla  
ZSW  
powalla@zsw-bw.de

## Einführung

Der Markt für Solarzellen wächst. Die jährliche Wachstumsrate betrug in den letzten Jahren mehr als 30% und es wird weiterhin eine steigende Nachfrage nach Solarmodulen erwartet. Deutschland ist sowohl bei der Anzahl der installierten Solarmodule als auch im Bereich der Photovoltaiktechnologien weltweit mit führend. Allein in Deutschland gehen in den Jahren 2006 bis 2008 Dünnschicht-PV-Produktionen mit mehr als 100 MW<sub>p</sub> Jahreskapazität an den Start.

Wichtige Wegbereiter für diese Erfolgsgeschichte sind das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), mit seiner Strom-Einspeisevergütung, und die kontinuierliche Förderung der Forschung und Entwicklung an den Instituten und in der Industrie. So wurde z. B. die Entwicklung von Dünnschicht-Solarzellen von 1975 bis 2006 mit 260 Mio. Euro gefördert [1].

## Skalierung der Prozesse zur Abscheidung von Dünnschicht-Solarzellen

Am Anfang haben Forschungsinstitute grundlegende Untersuchungen gemacht zum Solarzellenaufbau und zu deren Herstellbarkeit, auf zunächst kleinen Flächen. Die ersten Dünnschicht-Solarzellen waren nur wenige Quadrat-zentimeter groß und es galt, deren Machbarkeit zu zeigen und den Wirkungsgrad zu erhöhen. Viele der Prozesse zur Abscheidung der dünnen Schichten werden und wurden mit Vakuumabscheidungsanlagen durchgeführt. *Abbildung 1* zeigt ein Clustersystem zur Abscheidung der Kontaktschichten für Substratgrößen bis zu 100cm<sup>2</sup> für Forschung und Entwicklung.

*Abbildung 1*  
Clustersystem zur Abscheidung von metallischen und transparenten leitfähigen Schichten mittels Magnetron-sputtern





Abbildung 2  
Pilotanlage zur  
Abscheidung von  
metallischen Schichten  
bei hohen Tempera-  
turen auf Glas mit der  
Größe von 0,72m<sup>2</sup>

Im Zuge der öffentlichen Diskussion um die Begrenztheit der fossilen Energieressourcen, Umweltverschmutzung und steigende Energiekosten wuchs das Interesse an den regenerativen Energien. In den Forschungsinstituten wurden bereits Zellen mit Wirkungsgraden oberhalb von 10 % hergestellt.

Basierend auf Arbeiten der Universität Stuttgart begann das ZSW 1992 mit der Entwicklung von Fertigungstechnologien für  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  – Dünnschichtsolarzellen. Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung wurden systematisch in industriell anwendbare Prozesstechnologien umgesetzt, wobei sich Perspektiven für eine wirtschaftliche Umsetzbarkeit in die Produktion ergaben. Dies führte dazu, dass sich in der zweiten Hälfte der 90er Jahre kleinere Unternehmen gründeten und große Unternehmen vereinbarten Partnerschaften mit Technologieträgern von FuE-Instituten. Die Verfahrensprozesse waren jedoch damals nur auf Substratgrößen von wenigen Quadratzentimetern entwickelt und bezüglich Produktionskennzahlen wie Produktionsausbeute, Anlagendurchsatz bzw. -verfügbarkeit nicht optimiert.

Mit der Unterstützung durch geförderte Projekte entstanden zunehmend Beschichtungsanlagen für Substratgrößen von einigen hundert

Quadratzentimetern, um zu zeigen, dass die Prozesse auf größere Substrate skalierbar sind und damit auch wirtschaftliche Prozesse perspektivisch darstellbar sind. *Abbildung 2* zeigt eine Beschichtungsanlage für die Abscheidung von Metallen bei hohen Temperaturen für Dünnschichtsolarzellen auf Glassubstraten der Dimension  $120 \times 60 \text{ cm}^2$  für eine Pilotproduktion.

Parallel dazu wurden auch bei den Anlagenbauern und Solarzellenherstellern Beschichtungsverfahren für einzelne Schichten entwickelt. Ziel war es, die Schichteigenschaften zu verbessern und kostengünstigere Verfahren zu entwickeln.

Ein Schwerpunkt lag bei der Entwicklung von transparenten leitfähigen Schichten auf Basis von aluminiumdotierten Zinkoxid ( $\text{ZnO:Al}$ ) für den Frontkontakt in Dünnschichtsolarzellen.

Durch die Einführung der Rohrkathoden-Sputtertechnik in Verbindung mit keramischen Rohrtargets konnte gezeigt werden, dass die Beschichtungszeit und die Materialausnutzung, im Vergleich zum planaren Magnetron-Sputterverfahren, deutlich vergrößert werden kann.

Auch die Materialkosten pro Quadratmeter Substrat reduzierten sich dabei um ca. einen Faktor zwei bis drei gegenüber dem Sputtern

**Tabelle 1**  
Vergleich von Si-Wafer Solarzellen mit Dünnschicht solarzellen auf Glas

	Si-Wafer Solarzelle	Dünnschicht solarzelle auf Glas
Substratgröße [m <sup>2</sup> ]	0,024	0,72 bis 5,7
Taktzeiten Fertigungslinie pro Substrat [sec]	2 bis 4	60 bis 600
Wirkungsgrade [%]	14 bis 20	5 bis 13
Kontaktschichten	Siebdruck- und Galvanotechnik,	Vakuumbeschichtung
Absorber	chemische und thermische Verfahren	meist Vakuumbeschichtungsverfahren
Modulkonzept	Verschaltung der Wafer im Modul	integrierte Serienschaltung

von planaren Magnetrons. Trotzdem liegen die Rohrtargetkosten (ZnO:Al) für eine 30 MW<sub>p</sub> Produktionsanlage (10% Wirkungsgrad, 1000 nm Schichtdicke) immer noch bei ca. 1 Mio. € pro Jahr.

Weiterhin wurde und wird in Forschungsprojekten untersucht, ob das reaktive Sputtern von ZnO:Al von metallischen Targets ein für die Produktion einsetzbares Verfahren sein könnte. Dadurch könnten die Materialkosten noch einmal halbiert werden.

Interessant ist es, einige charakteristische Unterschiede in den Produktionstechnologien für waferbasierende Solarzellen und Dünnschicht solarzellen auf Glas näher zu betrachten. *Tabelle 1* zeigt ausgesuchte Merkmale der Produktionslinien für Solarzellen. Es ist zu erkennen, dass in der Produktion von Dünnschicht solarzellen auf Glas derzeit sehr viel Vakuumbeschichtungstechnik eingesetzt wird, während bei den waferbasierenden Solarzellen, abgesehen von der Vakuumabscheidung von Siliziumnitrit, fast keine Vakuumbeschichtungstechnik eingesetzt wird.

Die Anlagen für die Produktion von waferbasierenden Solarzellen kommen ursprünglich aus der Mikroelektronik. Sie müssen aber für die Solarzellenproduktion noch mehr auf hohen Durchsatz getrimmt werden. Die Linientaktzeiten für die waferbasierenden Solarzellen liegen im Sekundenbereich. Sie sind damit 30- bis 200-mal kürzer als die Linientaktzeiten für Dünnschicht solarzellen, die im Minutenbereich liegen.

Die Produktionstechnik für die Dünnschicht solarzellen profitiert im starken Maße von dem langjährigen Know-how aus der Architekturglasbeschichtung und der Displaytechnik. So werden z. B. seit vielen Jahren mit Vakuumbeschichtungstechnik Wärmeschutzbeschichtungen mittels Magnetronsputtertechnik hergestellt – und das auf Glassubstraten mit einer Größe von bis zu 19 m<sup>2</sup>. *Abbildung 3* zeigt eine Architekturglasbeschichtungsanlage zur Beschichtung von 3,2 x 6m<sup>2</sup> großen Glasscheiben. Diese Anlagentechnik kann in Taktzeiten von bis zu 35 Sekunden Glas beschichten. Damit werden jede Minute 33m<sup>2</sup> Glas beschichtet.

**Abbildung 3**  
Architekturglasbeschichtungsanlage zur Abscheidung von Wärmeschutzschichten auf Glas mit der Größe von 19,2m<sup>2</sup>



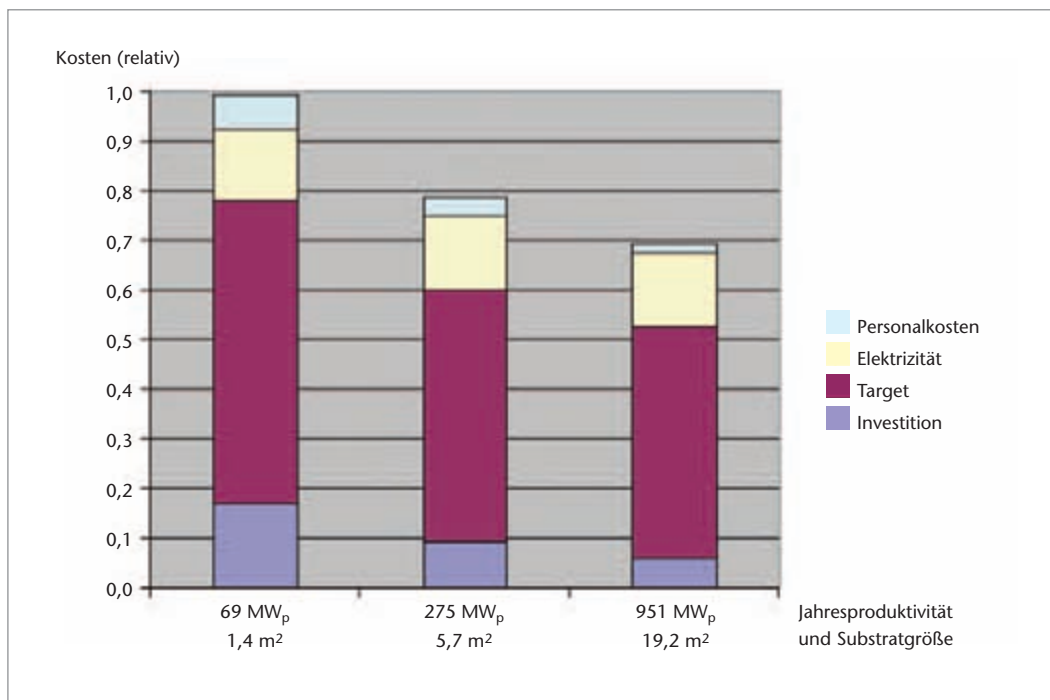


Abbildung 4  
Vergleich der Herstellkosten in Abhängigkeit von der Substratgröße (Produktionskapazität) für die transparente leitfähige Kontaktschicht ZnO:Al (TCO)

Die Entwicklung dieser großflächigen Vakuumbeschichtungsverfahren für Architekturglas begann in den 80er Jahren. In den 90ern startete die Entwicklung der großflächigen Beschichtungstechnik für die Displayfertigung. Es wurden für die Photovoltaik PVD- und PECVD-Beschichtungsverfahren entwickelt, die Substrate mit einer Größe von bis zu 5,7 m<sup>2</sup> beschichten können. Die ersten Produktionslinien für diese Substratgrößen werden 2008 in Betrieb gehen.

## Auswirkung der Skalierung auf die Herstellungskosten

Die Skalierung der Prozesse auf große Substratgrößen, möglichst geringe Taktzeiten und möglichst hohe Wirkungsgrade bei geringen Materialverbrauchskosten sind die Schlüsselgrößen zur Reduzierung der Herstellkosten für Solarzellen. Bisher war es die oft noch nicht erzielte Technologiereife der verschiedenen Dünnschichtsolarellentechnologien und die hohen Investitionen für die Produktionstechnik, die die Markteindringung der Dünnschichtsolarellentechnologien erschwerte oder auch verhinderte. Bei kleineren Produktionslinien werden die relativ hohen Investitionen für die Produktionstechnik wesentlich durch die Vakuumbeschich-

tungsanlagen bestimmt. Eine Frage ist, inwieweit eine Vergrößerung der Substratflächen und damit der Produktivität die Produktionskosten für die Solarzellen reduzieren könnte und wie hoch denn tatsächlich der Kostenanteil für das Investment ist? Am Beispiel der Herstellung von ZnO:Al, einer transparenten leitfähigen Schicht (TCO), wird im Folgenden die Kostenverteilung näher erläutert und die Kostenentwicklung von der Beschichtung von 1,4 m<sup>2</sup> hin zu 19,2 m<sup>2</sup> großen Substraten betrachtet.

Abbildung 4 zeigt die Kostenverteilung für die Abscheidung einer 1000nm dicken ZnO:Al-Schicht (TCO) in Abhängigkeit von der jährlichen Produktionskapazität. Basis für diese Abschätzung sind drei verschiedene horizontale Vakuumbeschichtungsanlagen: Für die Jahreskapazität von 67 MW<sub>p</sub> wurde eine Anlage angenommen, die eine Substratgröße von 1,4 m<sup>2</sup> beschichtet (Generation 5). Die 270 MW<sub>p</sub> basieren auf einer Substratgröße von 5,7 m<sup>2</sup> (Generation 8.5) und die 930 MW<sub>p</sub>-Anlage (Jumbo-Coater aus der Architekturglasbeschichtung) beschichtet Substrate mit einer Größe von 19,2 m<sup>2</sup>.

Die Anlagen heizen die Substrate auf eine Temperatur von 200°C und haben eine Taktzeit von 60 sec. Es wurde ein Wirkungsgrad von

10 % angenommen. Die aufgeführten Kosten setzen sich aus den Kostenanteilen für die Investition für die Vakuumbeschichtungsanlage, für die Targets, für Energie und für das Personal zusammen. Es ist zu erkennen, dass die Kosten bei hohen Produktivitäten ganz wesentlich durch die Kosten für die Targets bestimmt werden. Die Skalierung der Anlagentechnik von 1,4 auf 19,2 m<sup>2</sup> reduziert die Produktionskosten um ca. 30 %. Bemerkenswert ist, dass der Kostenanteil für die Anlagentechnik, gerechnet für große Produktionskapazitäten und auf eine Abschreibedauer von 7 Jahren, unterhalb von 15 % liegt. Beim TCO in der Massenproduktion dominieren die Targets mit einem Kostenanteil zwischen 60 und 70 %.

Es zeigt sich also, dass mit zunehmender Produktionskapazität die Investitionskosten einen immer kleineren Anteil an den Gesamtkosten einnehmen.

## Schlussfolgerungen

Die Skalierung der Prozesse auf große Formate ist ein Ansatz die Produktionskosten zu senken, sofern die Prozesstechnologien dies zulassen. Mit der Einführung der Rohrkathoden-Sputtertechnik für die Kontaktschichten gelang es, den Targetverbrauch stark zu senken. Trotzdem bestimmen immer noch wesentlich die Targetkosten in der Massenproduktion die Herstellkosten, so dass man auch zukünftig besonders intensiv nach Lösungen suchen muss, die es erlauben, die Material- bzw. Targetkosten weiter zu reduzieren.

## Literatur

- [1] Chr. Hünnekes, Workshop Kristalline Silizium Dünnschichttechnologien, Erlangen, 2006, Forschungszentrum Jülich GmbH

# Von der Grundlagenforschung zur Produktion – Entwicklungspotenziale der Dünnschichtphotovoltaik an Beispielen aus der Si- und CIS-Technologie

## Einleitung

Um Photovoltaikstrom langfristig konkurrenzfähig gegenüber Strom aus anderen Energiequellen zu machen, ist eine Kostenreduktion in der Photovoltaik von ca. 5 % pro Jahr erforderlich. Dafür müssen alle Reduktionspotenziale ausgeschöpft werden. Hierzu gehören insbesondere die Reduktion des Materialeinsatzes und die Kostenreduktion durch den Einsatz großflächiger, automatisierter industrieller Herstellungstechnik.

Im Gegensatz zur heutigen Standardtechnik, bei der Siliziumscheiben mit ca. 15 cm x 15 cm Größe und ca. 250 µm Dicke eingesetzt werden, geht man in der Dünnschichttechnik andere Wege. Moderne Glasbeschichtungsanlagen z. B. für Anwendungen in der Architektur beschichten heute schon 3 m x 6 m große Glasscheiben im 45-Sekunden-Takt. Für die photovoltaische Stromwandlung mit ihren sehr spezifischen Halbleiterschichtsystemen liegen die applizierten Produktgrößen heute bei ca. 1 bis 2 m<sup>2</sup> und reichen nur in Ausnahmen bis ca 6 m<sup>2</sup>. Andere Techniken, wie z. B. in der Flachdisplaytechnik

[1], belegen eindeutig, dass die Kosten mit der Größe der produzierten Einheit sinken. Diesen Skalierungseffekt will man auch für die Photovoltaik nutzen.

Bei Dünnschichtsolarzellen wird die eigentliche Zelle mit einer Dicke von 3 µm bis 5 µm zwischen zwei Kontakten eingeschlossen und mit verschiedenen Beschichtungsmethoden auf einen Träger aufgebracht. Die Solarzellen werden mit in den Herstellungsprozess integrierten Strukturierungsmethoden (z. B. mit Laserschreiben) zu Modulen verschaltet. Die Halbleiter- und Kontaktschichten müssen zum Schutz vor Umwelteinflüssen verkapselt werden. Es werden zwei verschiedene Anordnungen verwendet:

- Substrat-Anordnung: Der Träger befindet sich auf der lichtabgewandten Seite.
- Superstrat-Anordnung: Der beschichtete Träger (Substrat) befindet sich auf der lichtzugewandten Seite

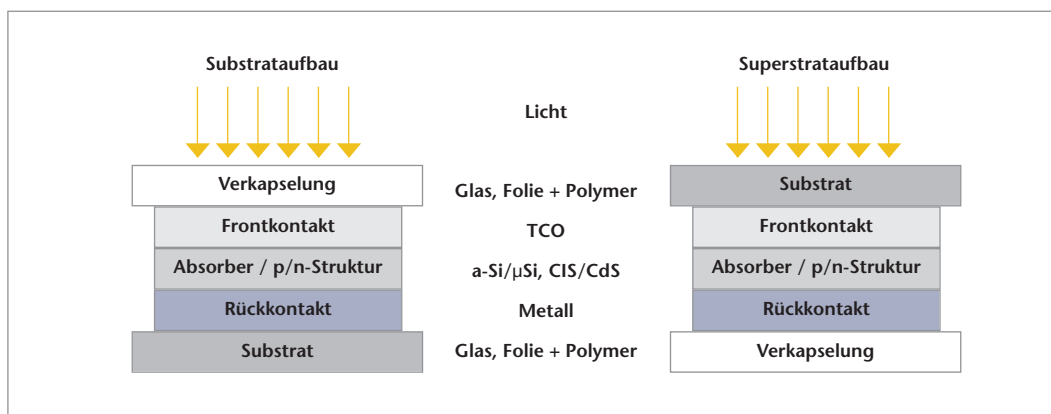
Den prinzipiellen Aufbau beider Anordnungsmöglichkeiten zeigt *Abbildung 1*.

Dr. Michael Powalla  
ZSW  
powalla@zsw-bw.de

Dr. Wolfhard Beyer  
FZJ  
w.beyer@fz-juelich.de

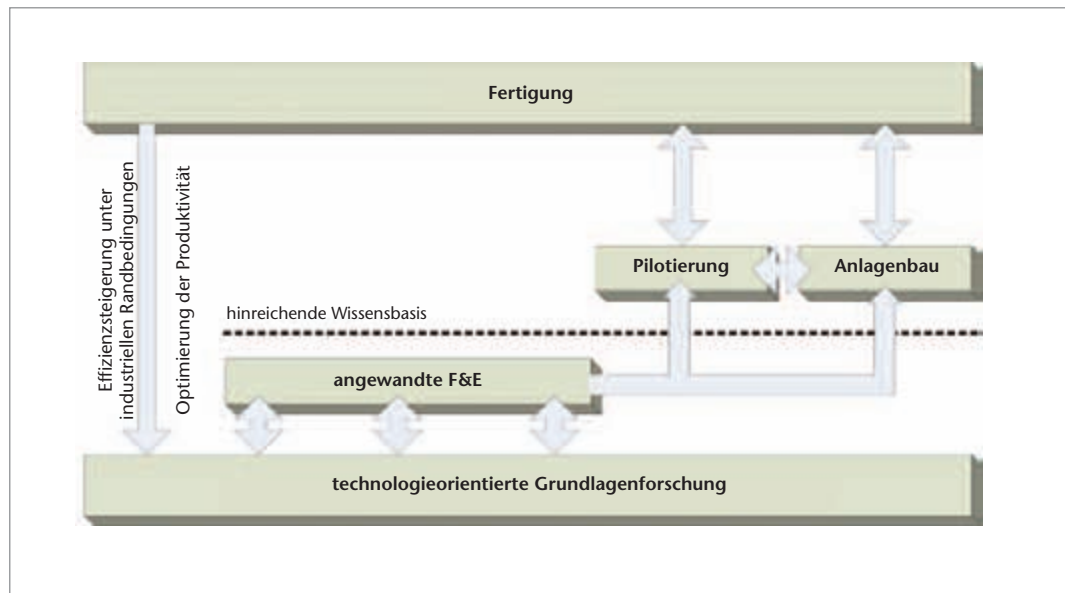
Prof. Dr. Martha Lux-Steiner  
HMI  
lux-steiner@hmi.de

Prof. Dr. Bernd Rech  
HMI  
bernd.rech@hmi.de



*Abbildung 1*  
Aufbau von Dünnschichtsolarzellen in Substrat- bzw. Superstrattechnik

Abbildung 2  
Von der technologieorientierten Grundlagenforschung zur Serienreife



Sowohl beim amorphem/mikrokristallinen Silizium als auch beim Kupfer-Indium-Selenid- (bzw. Schwefel-), kurz CIS, ermöglichten die Institute des Forschungsverbunds Sonnenenergie – HMI, Forschungszentrum Jülich und ZSW – große Fortschritte in der angewandten Forschung in Deutschland und öffneten damit den Weg für sinnvolle größere Investitionen in Produktionsstätten in Deutschland.

Außerdem kann sie auf Erkenntnisse aus der Flachdisplaytechnik zurückgreifen, in der vor allem die plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung wesentlich entwickelt worden ist.

3. Die Basis für eine Verbesserung des Preis-Leistungs-Verhältnisses der Dünnschichtsolarzellen bilden neue wesentliche Fortschritte aus der anwendungsnahen Grundlagenforschung.

## 1. Impulse aus der Grundlagenforschung in die Produktion

Siliziumdünnschichtsolarzellen und CIS-Solarzellen gibt es schon viele Jahre. Die grundlegenden Zellen- und Modul-Strukturen sind über 30 Jahre alt. Dass der bisher größte Investitionsschub in die Jahre 2006/2007 fällt, hat drei wesentliche Gründe, die insbesondere durch ihre Gleichzeitigkeit Wirkung entfalten.

1. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in Deutschland garantiert den Investoren langfristig abgesicherte Märkte.
2. Die Großflächenbeschichtung hat, angetrieben durch andere Märkte, schnelle Fortschritte erzielt. Die Dünnschichtphotovoltaik kann Synergien aus der Sputtertechnik nutzen, die u. a. für die Herstellung von Wärmeschutzgläsern für Wärmeschutzmaßnahmen an Gebäuden entwickelt wurde.

Die Herausforderung, der sich die Forschung und Entwicklung in Zukunft zu stellen hat, besteht darin, zwei Optimierungen gleichzeitig zu erreichen (siehe *Abbildung 2*):

1. Optimierung der Produktivität durch
  - Reduktion der Materialkosten (insbesondere Materialeinsatz)
  - Erhöhung des Anlagendurchsatzes (Prozessgeschwindigkeit) und
  - Anlagenverfügbarkeit (z. B. Automatisierung)
2. Steigerung der Umwandlungseffizienz der photovoltaischen Bauelemente durch
  - Minimierung der optischen Verluste wie z. B. Lichtfallen für die einfallende solare Strahlung oder verbesserte spektrale Nutzung des gesamten Sonnenspektrums wie, der elektrischen (ohmschen) sowie der elektronischen (Rekombinations-) Verluste.



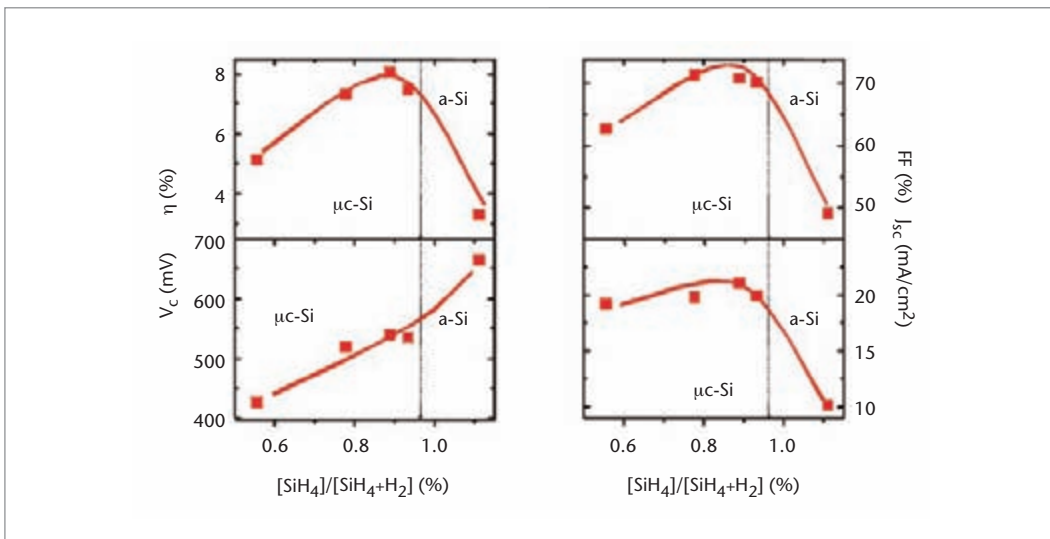


Abbildung 3

Die Variation der Silan-Wasserstoff-Mischung bei der Plasmadeposition verändert den relativen Anteil der Schichtkomponenten  $\mu\text{c-Si}$  und  $\text{a-Si}$  und damit auch die Solarzellenparameter [2]

Langfristig betrachtet, müssen aus der Grundlagenforschung heraus neue Konzepte für Bauelementstrukturen und neue Materialien entwickelt werden. Mit neuen analytischen Methoden und Simulationstools erfolgt ein notwendiges grundlegendes Verständnis der Verlustmechanismen der Bauelementstrukturen.

Es müssen neue Ideen aus der anwendungsorientierten Grundlagenforschung in die Weiterentwicklung einfließen, damit sich in den schnell wachsenden Märkten die einzelnen Fertigungstechnologien im Wettbewerb nicht in eine Sackgasse bewegen. Nur bei langfristig erhaltenen hohen Lernraten in der Grundlagenforschung kann das Verhältnis von minimalem Einsatz von finanziellen Mitteln pro elektrisch erzielbarer Leistung (Wattpeak) auf die Zielgröße von unter 1 €/Wp gesenkt werden. Gerade die Rückkopplung mit der jetzt existierenden Fertigung ermöglicht eine zielgerichtete Entwicklung (Abb. 2).

### 1.1 Si-Dünnschichttechnik

Die Entwicklung der Silizium-Dünnschicht-Solarzelle basiert auf einer Vielzahl von Arbeiten der Grundlagenforschung und der Technikentwicklung über einen Zeitraum von 40 Jahren. In Form der amorphen Silizium-Technik (a-Si) wurde die Solarzelle bereits 1980 kommerzialisiert und dann kontinuierlich weiterentwickelt. In der jetzigen Kommerzialisierungsphase mit Produktionsankündigungen in Deutschland von etwa 200 MWp pro Jahr geht es sowohl um Einfachzellen aus amorphem Silizium als auch

um die Tandemsolarzelle auf der Basis von mikrokristallinem ( $\mu\text{c-Si}$ ) und amorphem Silizium. Letztere wurde neben den Pionierarbeiten aus der Schweiz (Universität Neuchâtel) hauptsächlich in Japan (Kaneka, Mitsubishi Heavy Industries usw.), Deutschland (Forschungszentrum Jülich) und USA (United Solar) entwickelt.

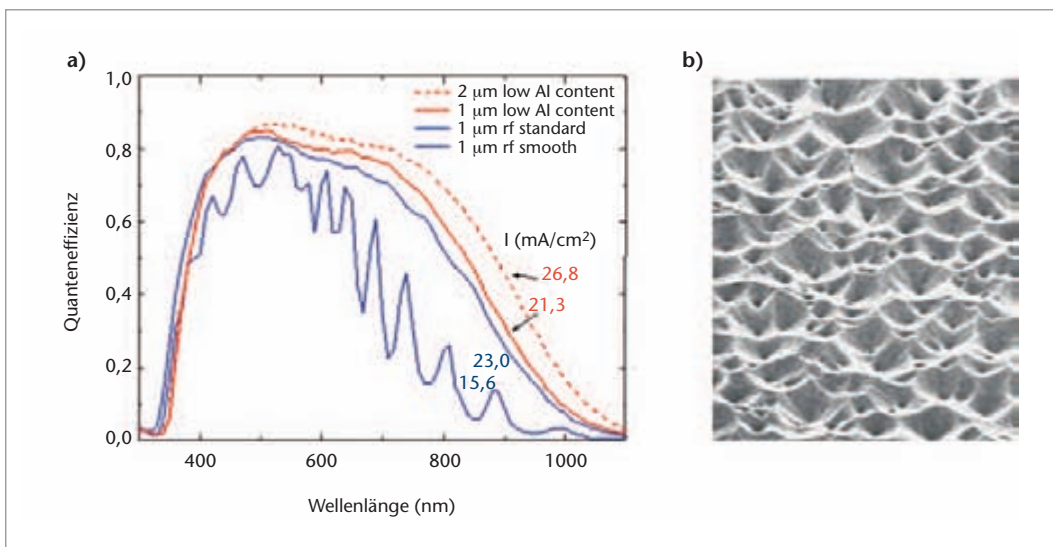
Bei der Jülicher PV-Technologie, die gegenwärtig von Brilliant 234 in die Produktion transferiert wird, spielten insbesondere zwei Forschungsthemen eine zentrale Rolle: die Depositionsbedingungen des mikrokristallinen Si-Materials und die Herstellung und Strukturierung der transparenten Kontaktschichten.

Strukturuntersuchungen zeigen mikrokristallines Si als ein komplexes Materialgefüge, das aus amorphen und kristallinen Bereichen besteht und Hohlräume sowie 5–10 % Wasserstoff enthält. Durch Variation der Depositionsbedingungen kann der relative Anteil der Schichtkomponenten verändert werden (Abb. 3).

Grundlagenforschungen zeigen, dass optimale Schichteigenschaften nicht durch einen hohen kristallinen Anteil erreicht werden, sondern dass Materialien im Übergangsbereich mit amorphen und mikrokristallinen Anteilen die besten Eigenschaften zeigen. Dies wurde für verschiedene Herstellungsverfahren wie Plasmadeposition bei den Frequenzen „RF“ (13.56 MHz) und „VHF“ (ca. 80 MHz) und Heißdrahtdeposition gefunden. Auch die Solarzellen zeigen für Absorber-

Abbildung 4  
(a) Einfluss der Oberflächenstruktur und der Dotierung von ZnO-Kontaktschichten auf die Quanteneffizienz und den Kurzschlussstrom von mikrokristallinen Si-Solarzellen

(b) Optimierte Oberflächenstruktur von ZnO [3]



material aus diesem Übergangsbereich optimale Eigenschaften. Als Ursache dieser günstigen Eigenschaften wird eine optimale Grenzflächenpassivierung der Silizium-Kristallite durch amorphes Silizium angesehen.

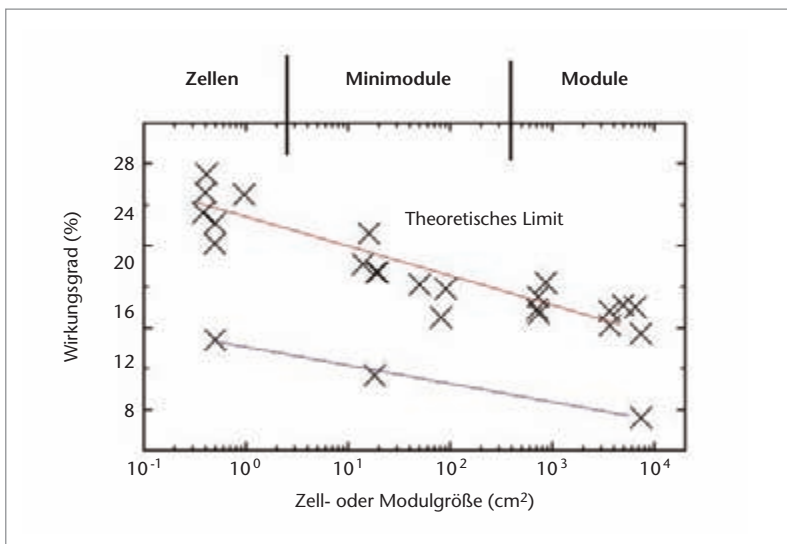
TCO sind Materialien mit hoher Transparenz und Leitfähigkeit. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die Oberflächenrauigkeit des Materials. Durch sie kann die Solarzelle als eine Lichtfalle hergestellt werden, was Material und Depositionszeit und damit Kosten spart. Die Grundlagenarbeiten in Jülich fokussierten sich auf Zinkoxid, das durch ein Sputterverfahren hergestellt wird. Nasschemisch ist dieses Material leicht zu strukturieren, und eine optimierte Oberflächenstruktur wurde durch Messreihen in Verbindung mit Simulationsrechnungen entwickelt (Abb. 4).

## 1.2 CIS-Technologie

Mit diesem Dünnschichtsolarzellentyp mit dem Absorbermaterial  $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$  (kurz: CIS) wurden in USA [4] und Japan [5] bisher die weltbesten CIS-Solarzellen hergestellt (auf Flächen kleiner 1 cm<sup>2</sup>) mit Wirkungsgraden von über 19 %. Damit hat die CIS-Technologie das höchste Wirkungsgradpotenzial aller Dünnschichttechniken. Für die Kommerzialisierung gibt es verschiedene Entwicklungsrichtungen:

- Die besten Wirkungsgrade für Zellen und Kleinmodule wurden bisher mit der Koverdampfungsverfahren erzielt.
- Großmodule (0,7 m<sup>2</sup>) werden auch mit Sputtertechnik und anschließender Selenisierung bzw. Schwefelbehandlung sehr

Abbildung 5  
Rekordwirkungsgrade von CIS-Zellen und -Modulen über der Aperturfläche aufgetragen (blau), sowie die theoretische Obergrenze (rot)



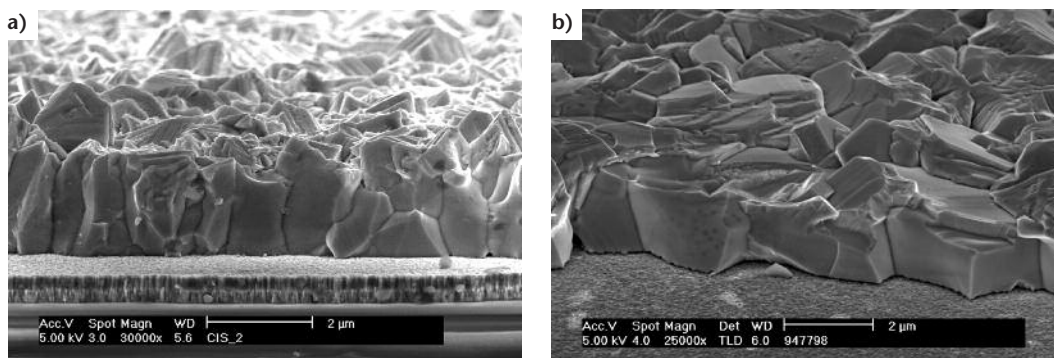


Abbildung 6  
Elektronen-  
mikroskopische  
Aufnahme von  
Bruchkanten:  
(a) ZSW „standard  
in-line“ Prozess [3].  
(b) CIS-Schicht aus  
modifiziertem Prozess.

erfolgreich hergestellt. *Abbildung 5* zeigt den aktuellen Stand sowie den noch deutlichen Abstand zur theoretischen Grenze.

Führend bei der hocheffizienten Selentechnologie ist die Firma Würth Solar in Schwäbisch Hall. Hier werden auf der Basis der Koverdampf-  
fungstechnologie, entwickelt vom Forschungs-  
partner ZSW, CIS-Module auf 0,6 m x 1,2 m  
Fläche mit 15 MW<sub>p</sub> Jahreskapazität produziert.  
Beste Module erreichen 13 % Wirkungsgrad.

c) Ein Konzept mit deutlich vereinfachter  
Prozesstechnik verfolgt die Firma Sulfurcell in  
Berlin. Mit einer sehr schnellen, vom HMI  
entwickelten zweistufigen Absorberabscheidung  
werden reine Kupferindiumsulfidschichten  
abgeschieden. Diese Module erreichen auf  
ähnlicher Größe etwas weniger Effizienz, sind  
aber leichter bzw. schneller herzustellen.

### 1.3 Aktuelle Forschungsergebnisse

Das ZSW erforscht mit Partnern anderer euro-  
päischer Solarinstitute und Universitäten das  
Wachstum der Halbleiterschicht Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>.  
Dabei spielt das Verständnis von Verunreinigun-  
gen, Inhomogenitäten und anderen Verlust-  
mechanismen z. B. an den Grenzflächen der  
Kristallite eine wesentliche Rolle. Eine neue  
Herstellungsmethode für CIS-Schichten im  
Durchlaufverfahren lässt Kristalle wachsen, die  
deutlich weniger Defekte aufweisen als die  
Standardverfahren. Eine elektronenmikrosko-  
pische Aufnahme einer Bruchkante im Vergleich  
zum Standardprozess zeigt *Abbildung 6*.

Mit dieser verbesserten CIS-Halbleiterqualität  
konnte der Laborbestwert für die kontinuierliche  
Beschichtung um fast zwei Prozentpunkte auf  
17,8 % (Fläche 0,5 cm<sup>2</sup>) gesteigert werden. Mit

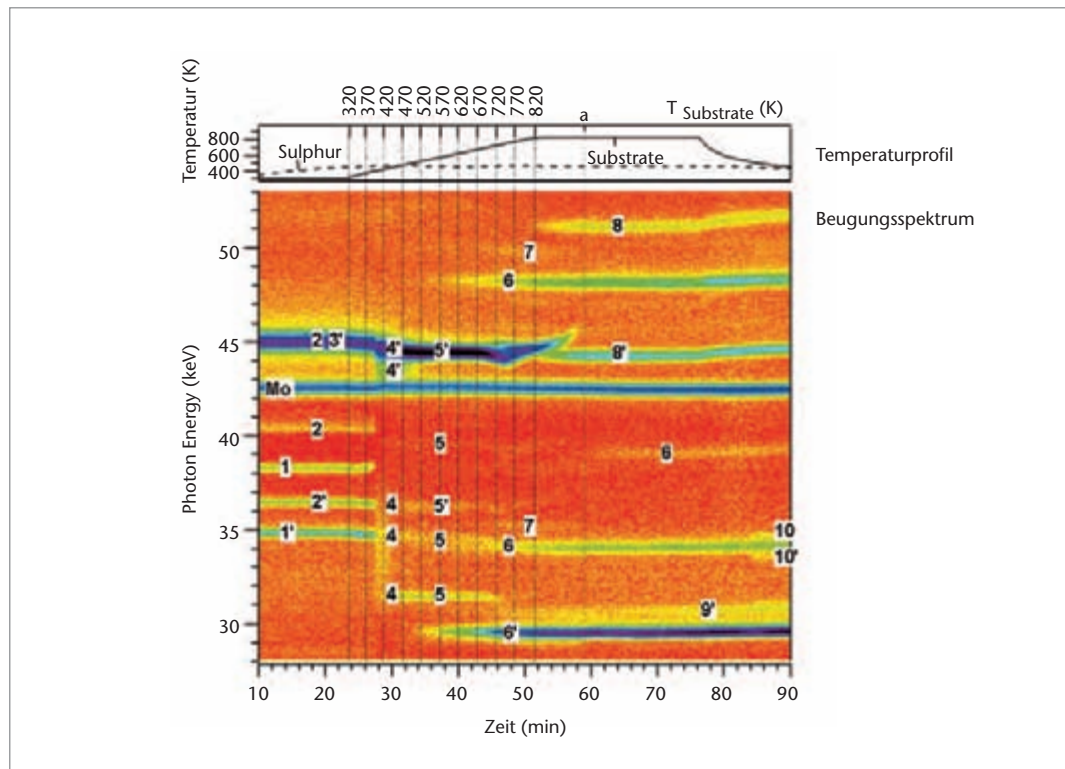
verbesserten Frontkontaktschichten wurden  
dann Kleinmodule mit knapp 16 % Wirkungs-  
grad (Fläche 10 cm x 10 cm) hergestellt.

Mittelfristig interessant sind die Ergebnisse von  
CIS-Solarzellen auf flexiblen Folien. Höhere  
Wirkungsgrade (aktuell ca. 7 % am ZSW) und  
modifizierte Verschaltungskonzepte für flexible  
Module bilden die aktuellen Forschungs-  
schwerpunkte.

Im Bereich der Chalkopyrit-Solartechnik arbeitet  
das HMI in Zusammenarbeit mit verschiedenen  
industriellen Partnern an Modifikationen der  
Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-Technologie. Beispiele sind flexible  
Substrate in Kombination mit Absorbern höchster  
Güte (ca. 15 % am HMI), alternativen Puffer-  
schichten, Methoden für die Prozess- und  
Qualitätskontrolle und alternative Dünnschicht-  
Präparationsmethoden. Die Arbeiten umspannen  
einen weiten Bereich von der grundlegenden  
Materialforschung bis hin zur Entwicklung von  
kleinflächigen Prototypen und anschließendem  
Technologietransfer. Ein Beispiel hierfür sind die  
CuInS<sub>2</sub>-Module, die am HMI auf einer Fläche  
von 5 cm x 5 cm demonstriert und von der  
ausgegründeten Firma Sulfurcell Solartechnik  
auf Produktgröße 0,65 m x 1,25 m skaliert  
wurden. Die Materialforschung wird insbeson-  
dere durch umfangreiche orts- und tiefenaufge-  
löste Analytik – teilweise auch in Verbindung mit  
Großgeräten wie dem BESSY Synchrotron –  
gestützt.

Ein aktuelles Beispiel grundlagengestützter Bau-  
elemententwicklung ist die Weiterentwicklung  
der Sulfid-Module in Richtung höherer Wir-  
kungsgrade durch den zusätzlichen Einbau von  
Gallium. Zunächst wurde im Labormaßstab  
unter Verwendung einer Verdampfungstechnik

Abbildung 7  
Echtzeitanalyse  
(EDXRD) des reaktiven  
Anlassens (Temperns)  
metallischer Vorläufer-  
schichten (Kupfer,  
Gallium, Indium) im  
Schwefeldampf.  
Die Ziffern bezeichnen  
identifizierte Phasen.



das Konzept bestätigt [6]. Im Übergang zur sequentiellen Technik traten Probleme auf, die einen Rückgriff auf die Materialforschung notwendig machten: Die Reaktionskinetik und Phasenbildung wurde mit Röntgendiffraktometrie (EDXRD) in Echtzeit am Synchrotron analysiert [7].

Abbildung 7 zeigt eine kinetisch gehemmte Reaktion, bei der ein Teil der metallischen Vorläufer auch nach sehr langer Zeit nicht mit dem Schwefel reagiert hat. Im oberen Teil der Abbildung ist das Temperaturprofil des Substrats dargestellt und das der Schwefelquelle. Im unteren Teil der Abbildung sind die Beugungsspektren zu sehen. Die Intensität ist farblich kodiert. Die Ziffern stehen für die identifizierten Phasen. Zwar bildet sich die Chalkopyritphase (6), aber nicht alle metallischen Phasen werden umgesetzt (8).

Anhand der weitergehenden Analyse konnten modifizierte Prozesse gefunden und die Kinetik so weit verbessert werden, dass eine technologische Umsetzung nunmehr möglich ist.

## 2. Ausblick auf 2020

Langfristig können Wirkungsgrade beim CIS von mehr als 20 % bzw. mehr als 15 % für a-Si/ $\mu$ c-Si nur erreicht werden, wenn die Wissensbasis erheblich fortentwickelt wird. Der langfristige Forschungsausblick wird im Folgenden für beide Technologien getrennt diskutiert.

### 2.1 Si-basierte Dünnschichttechniken

Eine Reihe von Ansätzen wird weltweit in der Grundlagenforschung verfolgt, um Wirkungsgrade über 15 % bei kurzer Depositionszeit zu erreichen. Insbesondere durch verbesserte TCO-Materialien und generell durch eine optimierte Lichteinkopplung werden höhere Wirkungsgrade bei kürzeren Depositionszeiten erwartet, weil die Solarzelle als Lichtfalle ausgelegt wird.

Andere wichtige Fragestellungen betreffen das Verständnis des Absorbermaterials selbst, die Grenzflächen zwischen den einzelnen Schichten, und das Erzielen hochleitfähiger Kontaktschichten. Weiterhin werden Tripel-Solarzellen, in denen eine weitere dritte Schicht das Sonnenlicht absorbiert, zu einer weiteren Steigerung

des Wirkungsgrades führen. Bereits jetzt sind die höchsten Wirkungsgrade mit Tripelzellen erzielt worden (Anfangswirkungsgrad ca. 15 %; stabilisierter Wirkungsgrad ca. 13,5 %) [8, 9].

## 2.2 CIS-basierte Dünnschichttechniken

Grundsätzlich können mit der CIS-Technologie Modulwirkungsgrade über 18 % realisiert werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Verlustmechanismen (Defekte, Inhomogenitäten, Verunreinigungen, Metastabilitäten) des Materialsystems besser verstanden werden. Verbesserte und auf die spezifischen Materialeigenschaften abgestimmte Untersuchungsmethoden wie z. B. die mikroskopische Abbildung der optoelektronischen Eigenschaften [10] müssen entwickelt werden. Gezielt werden neue Strukturen entwickelt, die bei minimalem Materialeinsatz das Sonnenspektrum gut ausnutzen. Multistapelzellen und Lichteinfang und -lenkung sind zwei Methoden, die in der Si-Wafertechnik bereits gut bekannt sind. Sie könnten künftig auch in der CIS-Technik zur Optimierung verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit ist, durch Reduzierung der Kontaktfläche Rekombinationsverluste zu verringern. Die um Größenordnungen kleinere Diffusionslänge der Ladungsträger in den Chalkopyriten erfordert zunächst eine theoretische Überprüfung des Konzeptes durch dreidimensionale numerische Modellierung.

Auch effizientere Materialien mit hohen Bandabständen und verbesserte p-leitfähige transparente Schichten müssen entwickelt werden und das Zusammenspiel von Präparationsparametern und Volumen- bzw. Grenzflächeneigenschaften muss besser verstanden werden. Nur mit besserem Materialverständnis können auch kostengünstige Produktionsmethoden mit hohen Wirkungsgraden erfolgreich entwickelt werden.

Selbstorganisierende Nanostrukturen sind ein Erfolg versprechender Ansatz. Empirisch wurden bereits kleinere Verluste gefunden, nachdem eine vollflächig kontaktierende Pufferschicht (Indiumsulfid) mit einer semi-isolierenden Passivierung (Zinksulfid) gemischt wurde [11].

## Danksagung

Die Arbeiten wurden und werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), dem Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), dem Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg und der Europäischen Kommission gefördert.

## Literatur

- [1] A. Büchel, Vortrag im Workshop Materials Valley, Alzenau (2002)
- [2] B. Rech, T. Roschek, T. Repmann, J. Müller, R. Schmitz, W. Appenzeller, *Thin Solid Films* 427 (2003), 157–165
- [3] B. Rech, T. Repmann, M.N. van den Donker, M. Berginski, T. Kilper, J. Hüpkes, S. Calnan, H. Stiebig, S. Wieder, *Thin Solid Films* 511–512 (2006), 548–555
- [4] M. Contreras, K. Ramanathan, J. A. AbuShama, F. Hasoon, D. L. Young, B. Eggas, and R. Noufi, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 13 (2005), 209
- [5] T. Negami et al., *Sol. Energy Materials and Solar Cells* 67 (2001), 331–335
- [6] R. Kaigawa et al., *Thin Solid Films* 415 (2002), 266
- [7] R. Mainz et al., *Thin Solid Films* 515 (2007), 5934
- [8] K. Yamamoto et al., In *Proceedings of 4th WCPEC, Hawaii* (2006), 1489
- [9] B. Yan et al., In *Proceedings of 4th WCPEC, Hawaii* (2006), 1477
- [10] R. Kniese, M. Powalla, U. Rau, *Thin Solid Films* 515 (2007), 6163–6167
- [11] N. A. Allsop, Ch. Camus, S. Gledhill, T. Unold, M. Ch. Lux-Steiner, T. Niesen, and Ch.-H. Fischer, *Thin Solid Films* (2007), im Druck

# Prozessentwicklung für die industrielle Pilotierung von Dünnschichttechnologien

Dr. Aad Gordijn  
FZ Jülich  
a.gordijn@fz-juelich.de

Dr. Reiner Klenk  
HMI  
klenk@hmi.de

Dr. Marc Köntges  
ISFH  
m.koentges@isfh.de

Dr. Stephan Wieder  
Applied Materials GmbH  
stephan\_wieder@  
appliedmaterials.com

Dr. Bernd Stannowski  
Q-Cells AG  
B.Stannowski@q-cells.com

## 1. Einleitung

In den letzten Jahren wurde die Technologieentwicklung im Bereich der Dünnschichtphotovoltaik durch die weltweit stark angestiegene Nachfrage nach Solarmodulen und durch weitreichende Fortschritte bei großflächigen Beschichtungstechnologien beschleunigt. Ebenso konnten nach langjährigen Forschungsarbeiten Herstellungsprozesse für Dünnschichtsolarmodule entwickelt werden, die für die industrielle Massenproduktion geeignet sind. Im Folgenden werden an zwei Beispielen der erfolgreiche Technologietransfer in Deutschland im Bereich der Silizium- und einer Chalkopyritbasierten Dünnschichtphotovoltaik dargestellt.

Daran waren beteiligt: das Forschungszentrum Jülich GmbH, das Hahn-Meitner Institut, Berlin, die Firmen Applied Materials GmbH & Co. KG, Q-Cells AG und SULFURCELL Solartechnik GmbH.

## 2. Silizium-Dünnschichtsolarzellen

Stapeldünnschichtsolarzellen, die aus wasserstoffdotiertem amorphem Silizium (a-Si:H) und mikrokristallinem Silizium ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) bestehen, können auf Grund der Bandabstände dieser Halbleiter einen großen Anteil des Sonnenspektrums zur photovoltaischen Energiewandlung nutzen. Beide Materialien können mit Plasma-deposition abgeschieden werden.

Auf TCO-beschichtetem Glas<sup>1</sup> wird zuerst die Topzelle aus amorphem Silizium (a-Si:H) und danach die Bottomzelle aus mikrokristallinem Silizium ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) deponiert. Als Rückkontakt dient eine Schichtkombination aus Zinkoxid (ZnO) und Silber (Ag). Die Gesamtschichtdicke einer solchen a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$  Tandemsolarzelle beträgt einige Mikrometer.

Bei amorphem Silizium liegt die technologische Herausforderung vor allem darin, eine Materialqualität zu erreichen, die unter Beleuchtung ein möglichst geringes Degradationsverhalten aufweist. Bei mikrokristallinem Silizium hingegen ist aufgrund der notwendigen relativ großen Absorberschichtdicke von 1-2  $\mu\text{m}$  eine hohe Abscheidungsrate wichtig. Aufgrund des geringen Materialverbrauchs und der niedrigen Prozesstemperatur bei der Herstellung der Solarzelle ist das Kostensenkungspotenzial groß.

<sup>1</sup> TCO ist eine transparente und leitfähige Oxidschicht.

Abbildung 1  
Aufbau einer  
a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$   
Tandemsolarzelle in  
pin-pin Konfiguration

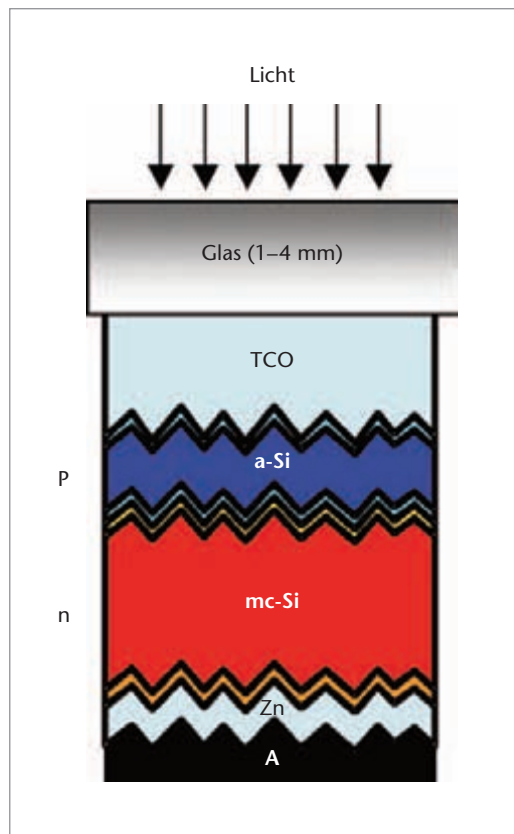




Abbildung 2  
Beschichtungsanlage  
ARISTO mit „in-line“-  
Konzept zur  
Herstellung von  
1,4 m<sup>2</sup> großen  
Silizium-Dünnschicht-  
solarmodulen

## 2.1 Technologieentwicklung

Am Institut für Energieforschung (IEF5-Photovoltaik) des Forschungszentrums Jülich wurde seit dem Jahr 2000 ein komplettes Labor für die Herstellung von Silizium-Dünnschichtsolarmodulen aufgebaut, so dass alle relevanten Prozessschritte (außer der Modulverkapselung) für eine Substratgröße von 30 x 30 cm<sup>2</sup> möglich sind.

Zur großflächigen homogenen Abscheidung von amorphem und mikrokristallinem Silizium mittels plasmauntersützter Gasphasenabscheidung (PECVD) wurde in Zusammenarbeit mit den Firmen Applied Materials GmbH & Co. KG (Alzenau) und FAP GmbH (Dresden) ein Planar-elektrodenesign entwickelt, das eine homogene Gaseinspeisung und eine homogene RF-Potenzialverteilung ermöglicht. Die Unterteilung der Solarmodulfläche in eine Anzahl Solarzellenstreifen, die miteinander in Serie verschaltet sind, geschieht mittels Laserstrukturierung. Der Schichtaufbau einer Jülicher Tandemsolarzelle ist in *Abbildung 1* dargestellt. Auf einer Größe von 30 x 30 cm<sup>2</sup> konnten Modulwirkungsgrade von 10,6 % erreicht werden.

## 2.2 Großflächige industrielle Beschichtungsanlagen

Der Hersteller von Beschichtungsanlagen Applied Materials hat auf der Basis der am Forschungszentrum Jülich entwickelten Silizium-Dünnschichttechnologie und in Kooperation mit Jülich ein Produktionssystem zur Fabrikation von 1,4 m<sup>2</sup> großen Silizium-Dünnschichtsolarmodulen entwickelt.

Hierfür wurde das schon vielfach zu anderen Produktionszwecken eingesetzte Beschichtungssystem ARISTO mit einem „in-line“-Konzept für a-Si:H und  $\mu$ c-Si:H Plasmadepositionsprozesse angepasst, die eine homogene Siliziumabscheidung auf einer Fläche  $\geq 1$  m<sup>2</sup> ermöglichen. Die komplette Beschichtungsanlage besteht dabei aus mehreren Depositionskammern, in denen die unterschiedlichen Einzelschichten der Reihe nach abgeschieden werden können (*Abbildung 2*). Nach einer bestimmten Taktzeit wird dabei das Glassubstrat zur nächstgelegenen Depositionskammer weitertransportiert. Erste Depositionen von a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H Tandem-Modulen in der Beschichtungsanlage ARISTO auf 30 x 30 cm<sup>2</sup> Glassubstraten erzielten einen Modulwirkungsgrad von 10,1 %. Dabei wurden außer der Siliziumabscheidung alle Prozessschritte am Forschungszentrum Jülich durchgeführt.

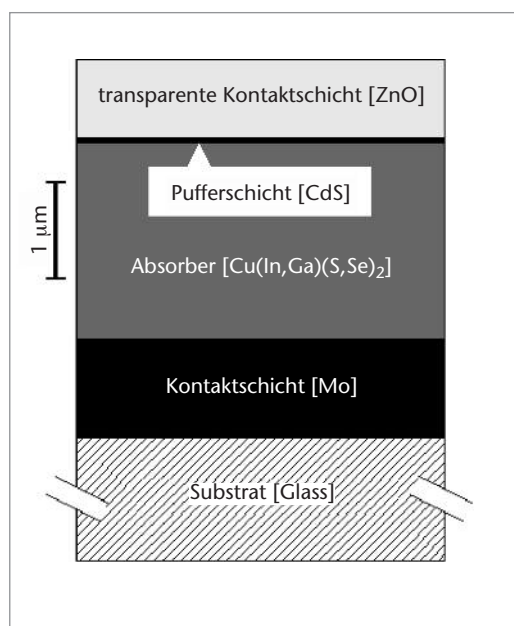
Abbildung 3  
Prototyp eines a-Si:H/  
 $\mu$ c-Si:H Tandemsolar-  
moduls mit 107 W<sub>p</sub>  
Nennleistung und  
1,4 m<sup>2</sup> Fläche



### 2.3 Industrielle Massenproduktion

Die Firma Brilliant 234 GmbH, ein Tochterunternehmen des Solarzellenherstellers Q-Cells AG, hat als erster Kunde das „in-line“ Beschichtungssystem ARISTO von Applied Materials Films erworben. In Kooperation mit Applied Materials und dem Forschungszentrum Jülich wurden bereits erste Prototypen von Silizium-Dünnschichtsolarmodulen hergestellt. Der Aufbau einer technologischen Produktionslinie wird noch in diesem Jahr abgeschlossen. Das erste funktionsfähige 1,4 m<sup>2</sup> a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H Tandemsolarmodul weist eine Nennleistung von 107 W<sub>p</sub> auf, was einem Modulwirkungsgrad von 8,3 % entspricht (Abbildung 3). Die Pilotierung der FZJ-Technologie wird begleitet von Lizenz- und Kooperationsverträgen.

Abbildung 4  
Schematischer  
Querschnitt einer  
Chalkopyrit-Solarzelle  
mit typischen  
Materialien (in eckigen  
Klammern)



## 3. Chalkopyrite

Auf Dünnschichtverbindingshalbleitern beruhen weitere erfolgreiche Ansätze für die Massenproduktion preisgünstiger und leistungsfähiger Photovoltaikmodule. Die Flexibilität des Chalkopyrit-Systems ermöglicht, einen weiten Bereich abzudecken; zwischen einfacher und schneller Prozessierung und mittlerem Wirkungsgrad bis zu etwas aufwändigeren Technologien, die dafür die mit Abstand höchsten Wirkungsgrade im Dünnschichtbereich hervorbringen. Das Hahn-Meitner-Institut (HMI) kooperiert mit mehreren Industriepartnern. Wichtige Themen sind:

- Erhöhung des Wirkungsgrades
- optimierte Langzeitstabilität
- Verfahren zur Prozesskontrolle und zum Qualitätsmanagement
- Verwendung von Rohmaterialien, die für die Massenproduktion ausreichend zur Verfügung stehen und ökologisch unbedenklich sind
- flexible Substrate
- alternative Prozesse (z. B. durchgehend trockene, vakuumfreie, roll-to-roll)

### 3.1 Technologieentwicklung

Als Beispiel wird die Entwicklung der CuInS<sub>2</sub>-Technologie gewählt. In vorangegangenen Arbeiten wurde CuInS<sub>2</sub> als Absorbermaterial identifiziert. Das HMI und die Universität Stuttgart erreichten 1993 den wichtigen Meilenstein einer CuInS<sub>2</sub>-Dünnschichtsolarelle in Verdampfungs-technik mit 10 % Wirkungsgrad. Drei Jahre später begann das HMI die gezielte Entwicklung einer Technologie, die schon auf die spätere Skalierung ausgerichtet war:



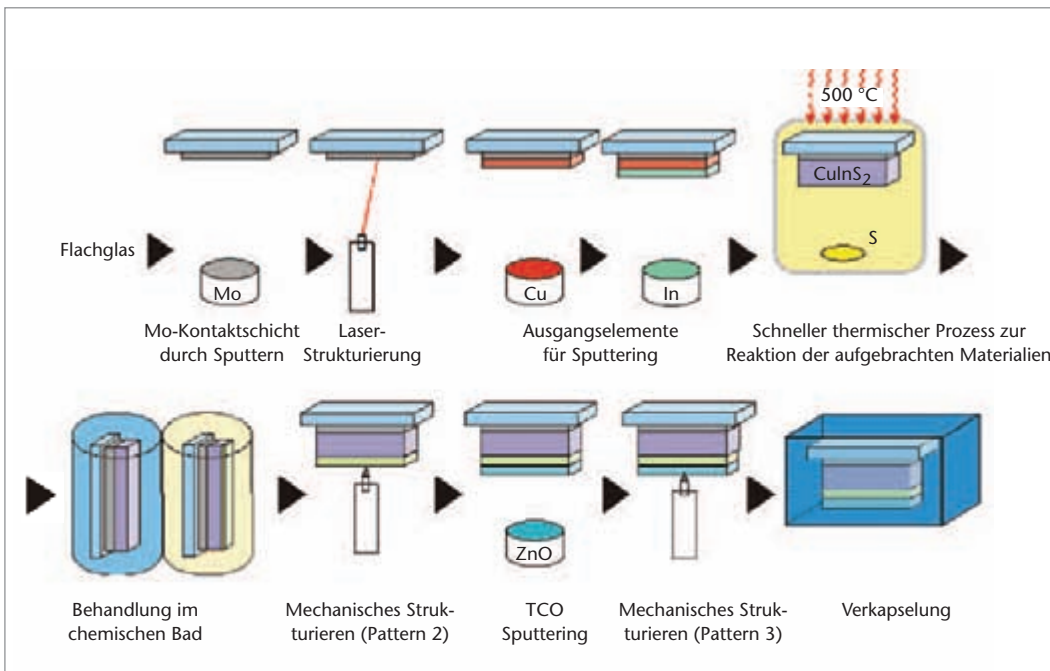


Abbildung 5  
Fertigung eines  
CuInS<sub>2</sub>-  
Dünnschichtmoduls

- weitestgehende Verwendung von in der Industrie bereits etablierter Beschichtungsverfahren (Magnetron-Sputtern)
- einfache Zellstruktur,
- minimierte Reaktionszeit (Rapid Thermal Sulphurisation)
- selbstjustierende Stöchiometrie des Absorbers

Anhand von Modul-Teststrukturen wurde auf kleiner Fläche (5x5 cm<sup>2</sup>) die für das spätere Produkt erforderliche monolithische Verschaltung und Verkapelung demonstriert und erste Testreihen zur Langzeitstabilität durchgeführt.

### 3.2 Technologie-Transfer und Skalierung

Die vorliegenden Ergebnisse führten in 2001 zur Gründung der SULFURCELL Solartechnik GmbH durch junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des HMI. Erstes Ziel der Firma war die direkte Skalierung der Teststruktur des HMI zur vollen Produktgröße (PV-Modul 65 x 125 cm<sup>2</sup>). Nach Einwerbung des erforderlichen Kapitals wurde ein Gebäude in Berlin-Adlershof angemietet und mit dem Aufbau einer Pilotlinie begonnen. Die ersten Module konnten Ende 2005 gefertigt werden. Es hat sich gezeigt, dass die in der Pilotproduktion aufgetretenen

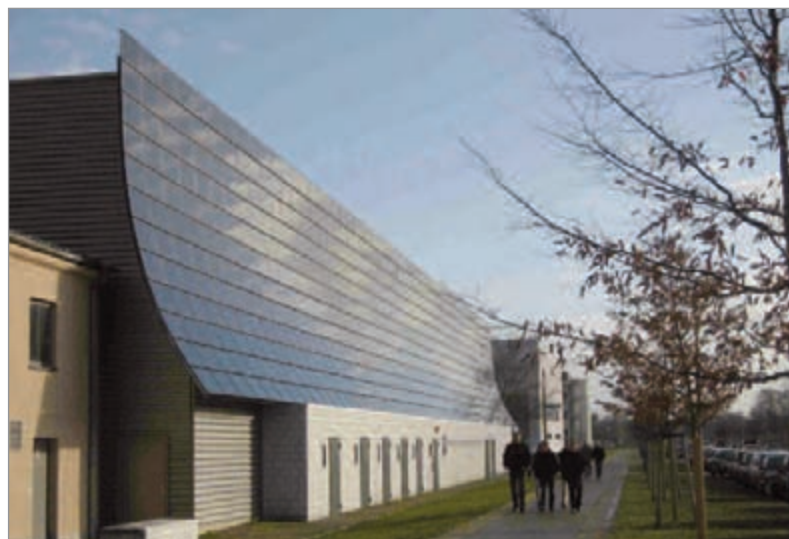


Abbildung 6  
Photovoltaik-Fassade  
aus CuInS<sub>2</sub>-Modulen  
der Firma Sulfurcell  
(Anlage am Ferdinand-  
Braun-Institut in  
Berlin-Adlershof)

Probleme teilweise andere sind als anhand der vorangegangenen Technologieentwicklung extrapoliert wurden. Für die Erforschung der wissenschaftlichen Grundlagen ergaben sich dadurch neue Fragestellungen.

Schon daraus ist ersichtlich, dass eine Kooperation zwischen Forschung und Industrie auch nach der ersten Phase des Technologietransfers von großer Bedeutung ist. Das HMI begleitet die Pilotierung im Rahmen eines Lizenz- und Kooperationsvertrages und arbeitet zugleich an den bereits dargestellten weiteren Verbesserungen der Chalkopyrit-Technologie für zukünftige Produktionslinien. Ende 2007 wird bei SULFURCELL ein kumulatives Fertigungsvolumen von 1 MW<sub>p</sub> erreicht werden. Die kontinuierlich steigenden Produktionszahlen ermöglichten auch die ersten größeren Installationen (*Abbildung 6*).

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den nationalen und europäischen Geldgebern für die Projektförderung und bei den Mitarbeitenden von IEF5-Photovoltaik (FZ Jülich), Applied Materials GmbH Alzenau, Brilliant 234, HMI und SULFURCELL.

# 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

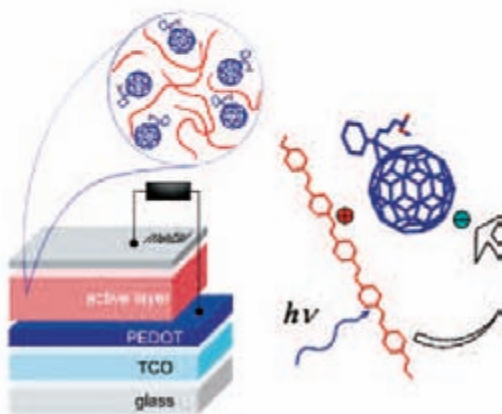
Dr. Kosta Fostiropoulos  
HMI  
fostiropoulos@hmi.de

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

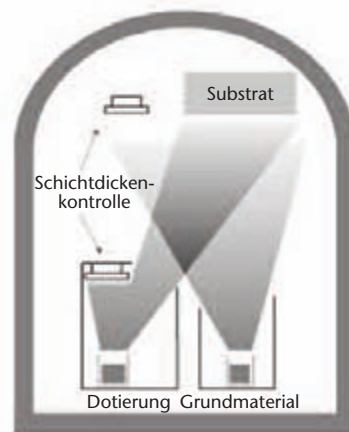


Abbildung 2  
Oben: Prinzip der Vakuumsublimation organischer Moleküle. Der lichtabsorbierende Halbleiter wird im Ultrahochvakuum in einer thermischen Verdampferquelle in die Gasphase überführt und kondensiert an der Oberfläche des Substrates.

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.

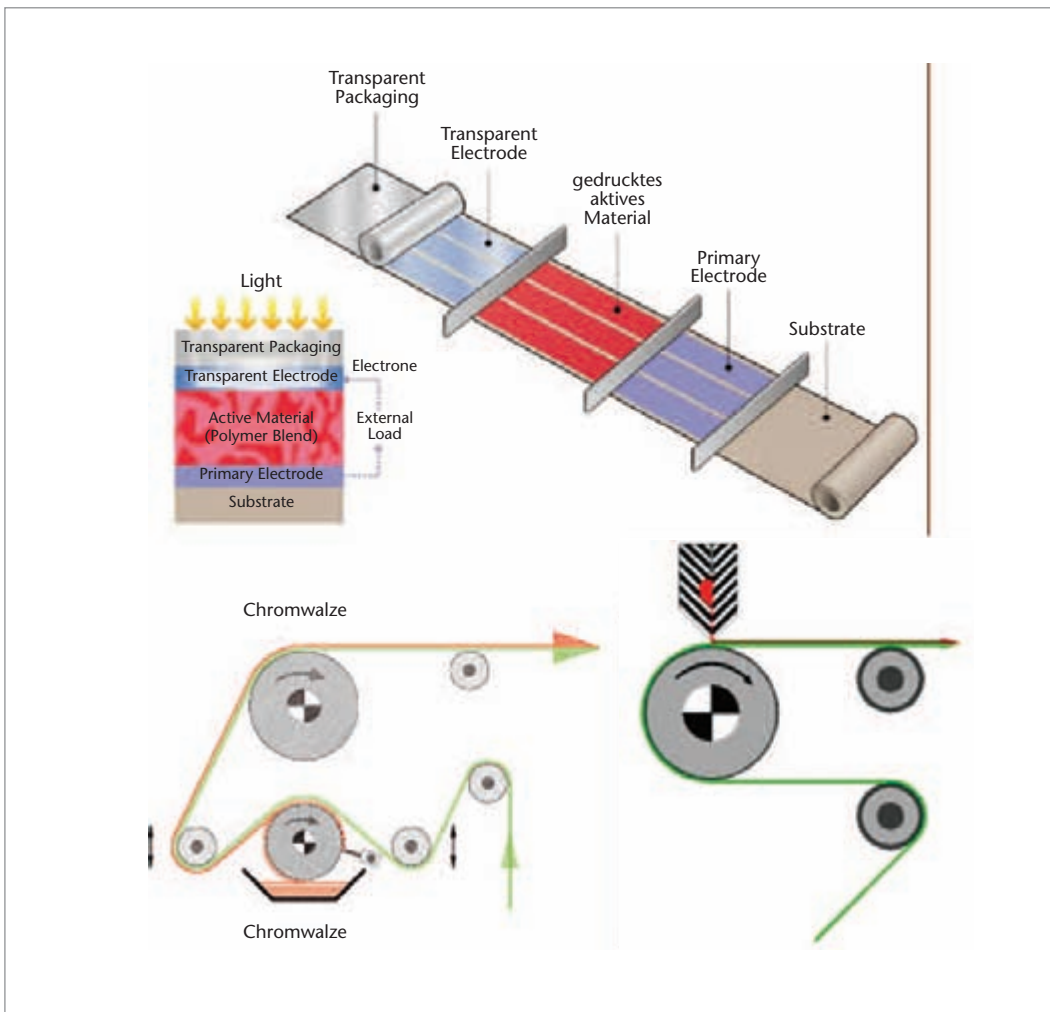


Abbildung 4

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 flüssig prozessierbarer 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.