

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 Glas¹ 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 μm eine hohe Abscheidungsrate wichtig. Aufgrund des geringen Materialverbrauchs und der niedrigen Prozesstemperatur bei der Herstellung der Solarzelle ist das Kostensenkungspotenzial groß.

¹ TCO ist eine transparente und leitfähige Oxidschicht.

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

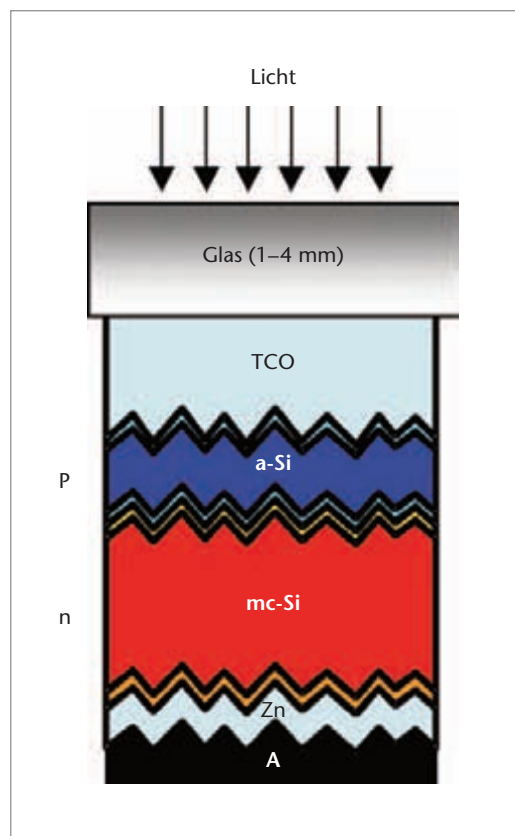




Abbildung 2
Beschichtungsanlage
ARISTO mit „in-line“-
Konzept zur
Herstellung von
1,4 m² großen
Silizium-Dünnschicht-
solarmodulen

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 cm² 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 Planarelektrodenesign 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 cm² 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 m² 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 μ c-Si:H Plasmadepositionsprozesse angepasst, die eine homogene Siliziumabscheidung auf einer Fläche ≥ 1 m² 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/ μ c-Si:H Tandemmodulen in der Beschichtungsanlage ARISTO auf 30 x 30 cm² Glassubstraten erzielten einen Modulwirkungsgrad von 10,1 %. Dabei wurden außer der Siliziumabscheidung alle Prozessschritte am Forschungszentrum Jülich durchgeführt.

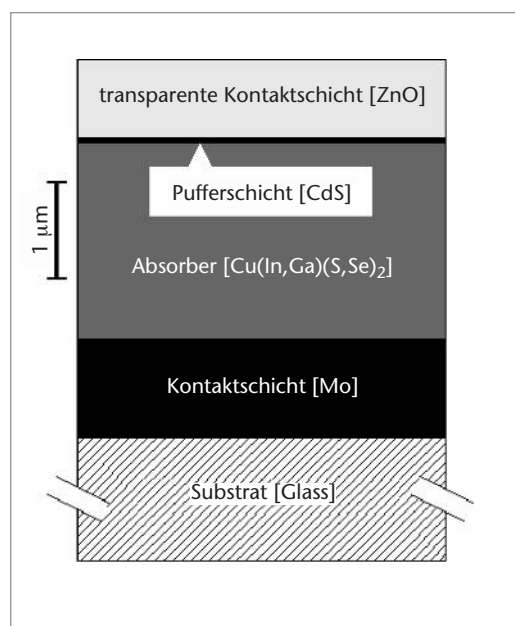
Abbildung 3
Prototyp eines a-Si:H/
 μ c-Si:H Tandemsolar-
moduls mit 107 W_p
Nennleistung und
1,4 m² Fläche



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 m² a-Si:H/ μ c-Si:H Tandemsolarmodul weist eine Nennleistung von 107 W_p 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 Dünnschichtverbundhalbleitern 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 CuInS₂-Technologie gewählt. In vorangegangenen Arbeiten wurde CuInS₂ als Absorbermaterial identifiziert. Das HMI und die Universität Stuttgart erreichten 1993 den wichtigen Meilenstein einer CuInS₂-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:

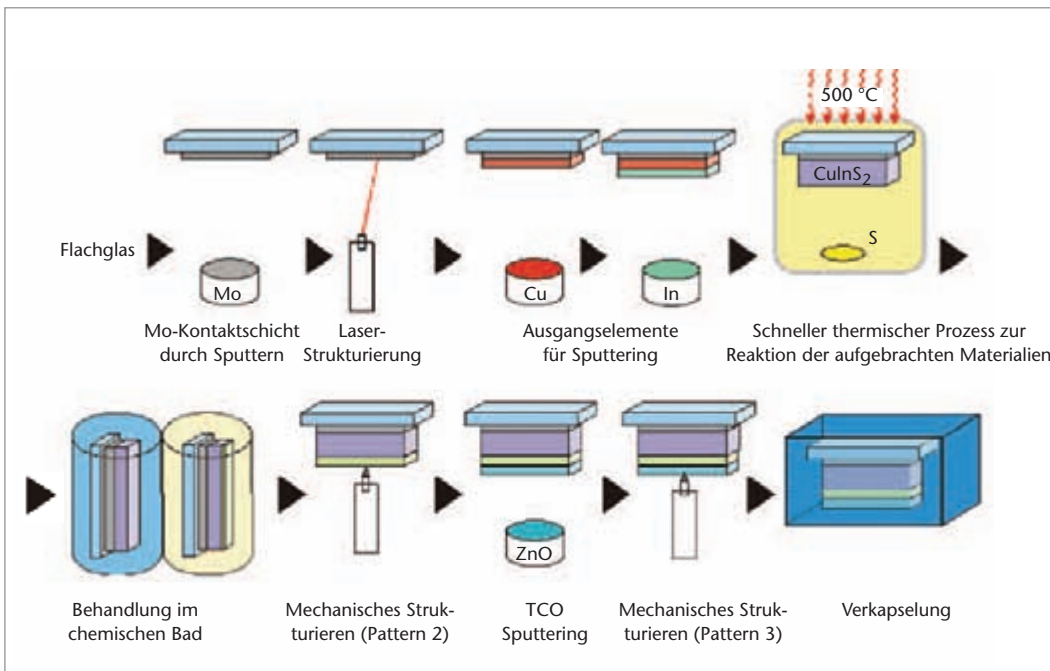


Abbildung 5
Fertigung eines
CuInS₂-
Dünnschichtmoduls

- 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 cm²) 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 cm²). 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

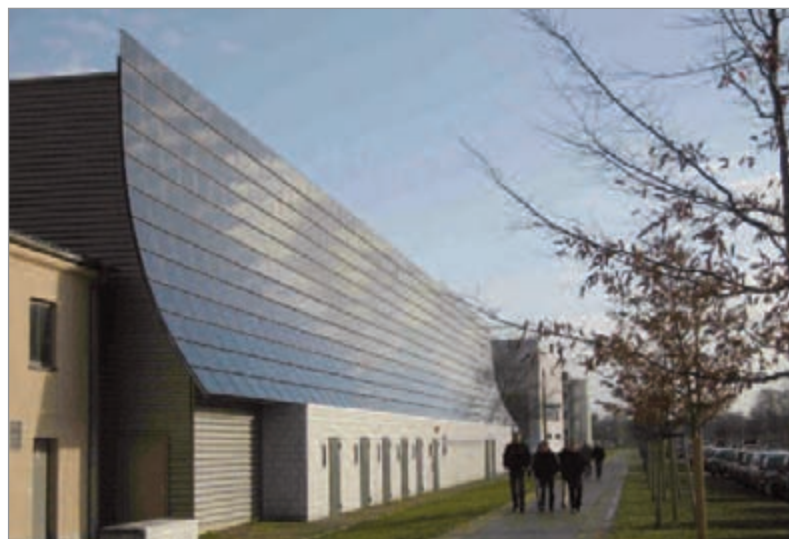


Abbildung 6
Photovoltaik-Fassade
aus CuInS₂-Modulen
der Firma Sulfurcell
(Anlage am Ferdinand-
Braun-Institut in
Berlin-Adlershof)

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_p 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.