

# TCO in Solarmodulen



## TCO-Schichten in CIGS-Dünnschichtsolarmodulen

Michael Powalla\*,  
Mike Oertel und  
Richard Menner  
Zentrum für Sonnenenergie  
und Wasserstoff-Forschung  
michael.powalla@zsw-bw.de

Die CIGS-Modul-Technologie wurde so weit entwickelt, dass man gegenwärtig den Bau einer CIGS-Solarzellen Pilotfertigung in Deutschland (Marbach am Neckar) plant. Ein wichtiges Element solch einer Solarzelle ist die TCO-Schicht (transparent conductive oxide), wie es z.B. das Zinkoxid (ZnO) darstellt. Dieses Material wird am ZSW aufgrund seiner Eigenschaften – gute Leitfähigkeit bei guter Transmission – als Frontkontakt einer CIGS-Solarzelle eingesetzt. Um eine hohe Leitfähigkeit zu realisieren, verwendet das ZSW als Dotierstoff Aluminium.

Das ZSW betreibt eine komplette CIGS-Modullinie, in der 30 cm x 30 cm große Solarmodule mit bis zu 12.7% Wirkungsgrad hergestellt wurden. Standardmäßig wird das ZnO:Al mittels eines DC-Sputterverfahrens vom keramischen Target in einer Durchlaufsputteranlage (Leybold-Z600) hergestellt. Neben den Schichteigenschaften spielen natürlich auch Faktoren, wie Depositionsrate, Sputterkosten, Stabilität etc. eine Rolle. In den vergangenen Jahren wurde ein Prozess entwickelt, der bei sehr hohen Depositionsraten (10 nm/s) gute Schichteigenschaften,  $R_{sq} = 8-10 \Omega$  bei einer max. Transmission von 88% auf D263 Glas, liefert.

Um eine Kostenreduzierung zu erreichen, versucht ZSW die Fensterschicht mit einem reaktiven Sputterprozess vom metallischen Zn:Al-Target herzustellen. Diese Targets sind derzeit um den Faktor zwei bis drei billiger als keramische Targets. Zur Stabilisierung und Kontrolle des reaktiven Sputterprozesses wird ein PEM-Kontroll-System (Plasma-Emission-Monitor) eingesetzt, welches den benötigten Sauerstoff separat dem Sputterprozess zuführt. Es hat sich auch hier gezeigt, dass mit dieser Sputtermethode

Depositionsraten bis zu 10 nm/s, allerdings bei wesentlich geringeren Leistungsdichten als beim keramischen DC-Sputtern, erzielt werden. Auch hier sind gute Schichteigenschaften zu verzeichnen ( $R_{sq} = 10 \Omega$ , max. Transmission > 85%). Problematisch ist allerdings noch die homogene Schichtabscheidung über große Depositionsflächen und die begrenzte Prozess-Stabilität bis zu bestimmten Leistungsdichten (max. 10 W/cm<sub>2</sub>). Ursachen für die lateralen Inhomogenitäten sind zum einen die schwierige Realisierung einer gleichmäßigen Sauerstoffverteilung entlang der Targetachse und zum anderen eventuelle Druckunterschiede in der Prozesskammer.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Stabilität der TCO-Schichten auf dem Absorbermaterial. Um dies zu untersuchen, werden die Schichten einem Damp Heat-Test unterzogen. Die Höhe der Degradation hängt zum einen von den Sputterparametern (Druck, Leistung, etc.) sowie von der Sputtermethode (DC, reaktiv), aber auch vom verwendeten Dotiermaterial (Al, Ga oder In) ab.

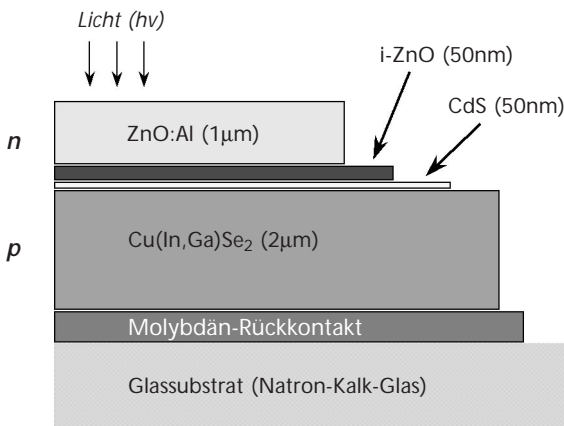


Abbildung 1  
Schematische Struktur  
einer CIGS-Solarzelle.

Abbildung 2  
Schematischer Aufbau des monolithisch integrierten CIGS-Moduls

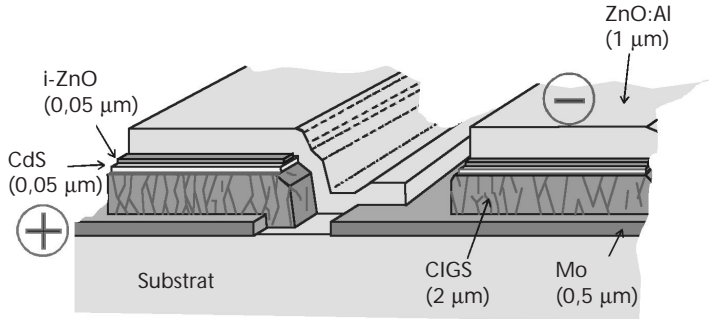
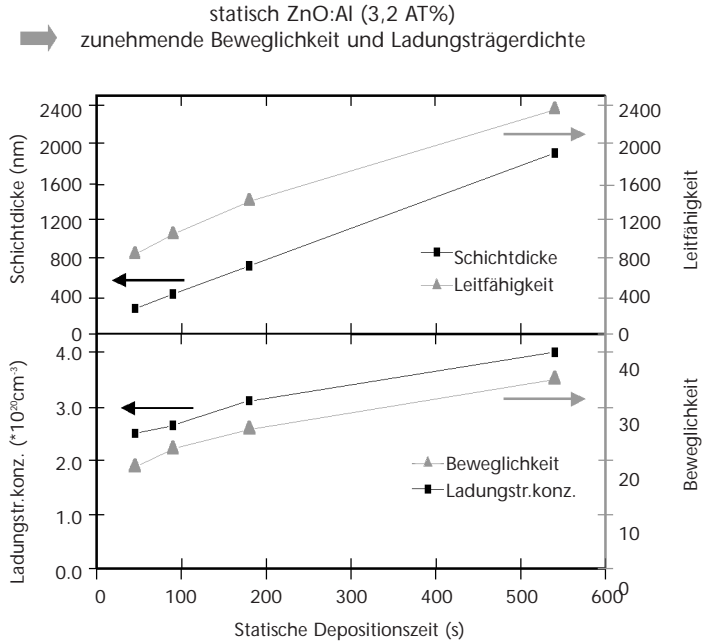


Abbildung 3  
Abhängigkeit elektrischer Schichteigenschaften von der Schichtdicke in ZnO:Al-Schichten, die statisch im DC-Modus vom keramischen Target abgeschieden wurden.



## Einflussfaktoren der TCO-Schicht auf die Moduleigenschaften

Schichteigenschaft	Moduleigenschaft
Transmission (T)	Strom
Schichtwiderstand (R)	Serienwiderstand
laterale Homogenität (T,R)	Modulperformance
Korrosionsfestigkeit	Stabilität

Grenzflächen:

TCO/i-ZnO	Zelleigenschaften
TCO/Mo	Kontaktwiderstand
Kontakt/TCO	Serienwiderstand, Stabilität

## Einflussfaktoren des Abscheideprozesses:

- Basisdruck, Depositionstemperatur (-profil)
- Sputterdruck, Sputterleistung
- Targetanordnung, Magnetron
- Gasverteilung
- aktive Regelung, In-situ-Prozesskontrolle
- Targetmaterial

## zusätzlich unter Produktionsbedingungen:

- dynamischer Prozess
- Sputterrate, Zykluszeit
- Wartungszyklen, Uptime
- Kosten: Investitionen, Verbrauchsmittel (Targets, Gase)
- Targetnutzungsgrad, Target-Rezyklierbarkeit
- Zuverlässigkeit



## Zusammenfassung

- Standard TCO für CIGS-Module  
DC-ZnO:Al,  $d = 1 \mu\text{m}$ ,  $T_{\text{max}} = 88\%$ ,  $R_{\text{sq}} = 9 \text{ Ohm}$
- 12,7% Wirkungsgrad für 30cm x 30cm Module erreicht
- gute Prozessstabilität über lange Zeiträume
- Homogenität im dynamischen Betrieb wichtig
- D/H-Stabilität prozess- und materialabhängig
- Würth Solar Pilotfabrik in Inbetriebnahmephase  
Anlagen installiert
- ZnO-Materialkosten von 0,03 DM/W<sub>p</sub> erreichbar
- Reaktivputtern für kleine Flächen o.k.  
für große Flächen weitere Entwicklungen notwendig

## TCO-Schichten für CTS-Dünnschichtsolarzellen

Effizienz und Herstellungskosten von CTS-Dünnschichtsolarzellen werden auch wesentlich von den Schichteigenschaften und dem Herstellungsverfahren des transparenten TCO-Frontkontaktes bestimmt.

Neben dem Herstellungsprozess der CTS-Zellen wird auf die TCO-Deposition eingegangen. ITO und SnO-Schichten werden auf in-line Anlagen durch teilreaktive DC-Kathodenzerstäubung deponiert. Das Optimum der Schichtwiderstände zur Erzielung guter Wirkungsgrade und Füllfaktoren liegt unter der Berücksichtigung der Herstellungskosten, bei 6-8 Ohm/sqr. Struktur und Aufbau der TCO-Schichten beeinflusst jedoch auch das Wachstum und die Eigenschaften der Halbleiterschichten.

Dr. Rainer Gegenwart,  
ANTEC GmbH, Kelkheim  
r.gegenwart@  
antec-gmbh.com



# TCO in Si-Dünnschicht-Solarmodulen

P. Lechner, R. Geyer und  
H. Schade

Angewandte Solarenergie –  
ASE GmbH

Peter.lechner@ase.tessag.com

B. Rech, O. Kluth und  
J. Müller

Institut für Photovoltaik,  
Teilinstitut des ISI  
Forschungszentrum Jülich

## Abstract

Die erforderlichen TCO-Eigenschaften und ihr Einfluss auf die Leistung von Si-Dünnschicht-Solarmodulen werden beschrieben und anhand von Beispielen demonstriert.

Dem gegenüber steht die Verfügbarkeit verschiedener TCO-Materialien und deren Quellen, die einer Bewertung unterzogen werden.

Vertretbare TCO-Preise in Relation zu den Modulherstellkosten werden diskutiert.