

# TCO-Schichten für die CIGS-Solarmodulproduktion

Die Firma Würth Solar GmbH & Co. KG hat im Jahre 2000 eine Pilotfertigung für CIGS-Dünnschichtsolarzellen in Betrieb genommen. Diese Linie mit einer maximalen Jahreskapazität von derzeit 1.5 MWp (ca. 12.000 m<sup>2</sup>) ist die Vorstufe für eine Serienfertigung mit mindestens zehnfachem Produktionsvolumen. Bei dieser angestrebten Größenordnung sind Herstellkosten zu erwarten, die unter den Kosten für konventionelle kristalline Siliziummodule liegen. Der bisher eingesetzte TCO-Prozess hat jedoch noch einen vergleichsweise hohen Anteil an den Herstellkosten. Der Entwicklungsschwerpunkt liegt - neben weiterer Qualitätsverbesserungen - auf der Reduzierung der Materialkosten.

M. Oertel  
mike.oertel@we-online.de

B. Dimmler  
Würth-Solar GmbH  
& Co. KG

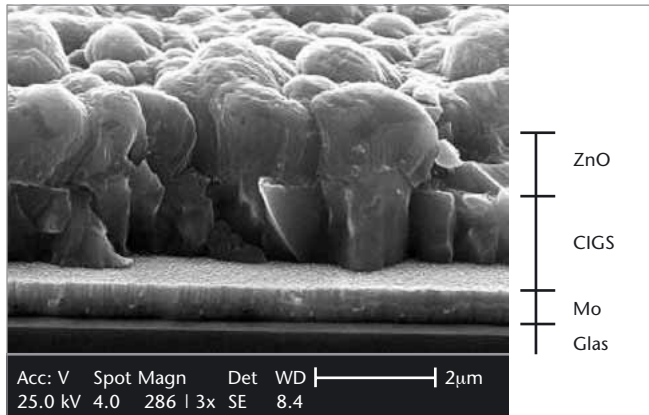


Abbildung 1  
Schematischer Aufbau einer CIGS-Dünnschichtsolarzelle mit monolithischer Verschaltung von zwei Einzelzellen

Der schematische Aufbau einer CIGS-Dünnschichtsolarzelle ist in *Abb. 1* dargestellt. Eine dazugehörige REM-Aufnahme (*Abb. 2*) zeigt einen Halbschnitt des gesamten Schichtpaketes.

Die Herstellung einer solchen Dünnschichtsolarzelle erfolgt außer für die Pufferschicht mittels Vakuum-Verfahren (PVD). Als Substrat wird Fensterglas verwendet (Dicke 2-4 mm),

Abbildung 2  
Rasterelektronen-  
mikroskop-Aufnahme  
einer CIGS-Dünn-  
schichtsolarzelle



das ganzflächig mit Molybdän (300-500 nm) als Rückkontakt beschichtet wird. Anschließend wird das Absorbermaterial (CIGS) und eine Pufferschicht aus CdS aufgebracht. Abschließend folgt die Herstellung des Frontkontaktes, welcher aus einer Zinkoxidschicht besteht. Zwischen den einzelnen Beschichtungen wird die monolithische Serienschaltung in insgesamt drei Schritten realisiert (Abb. 1). Um das Solarmodul im Ganzen gegen Feuchtigkeit und Wärme zu schützen, bedarf es einer Glas-Glas Lamination.

Mit diesen Technologien wurde in den letzten Jahren eine beachtliche Wirkungsgradentwicklung erreicht (Abb. 3a). Im Jahr 2003 wurde erstmals die 10%-Marke übertroffen. Gegenwärtig können Großmodule mit einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von über 11 % gefertigt werden. In der Spitze haben einzelne Module um 13 % Wirkungsgrad. Neben dem Standardmodul mit einer Fläche von 120 cm x 60 cm werden auch kundenspezifische Module hergestellt, die elektrisch, optisch sowie auch in ihrer Form an die Anwendung angepasst werden. Eine typische U-I-Kennlinie ist der Abb. 3b zu entnehmen.

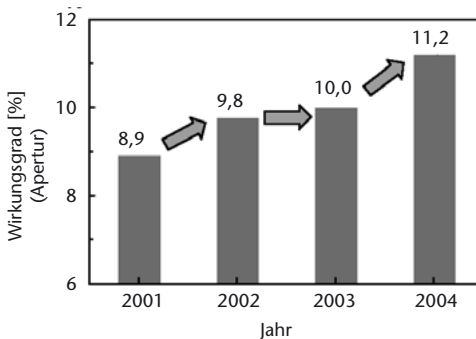


Abbildung 3a  
Durchschnittliche Wirkungsgradentwicklung bei Würth-Solar von 2001 bis 2004 auf  $120 \times 60 \text{ cm}^2$  großen CIGS-Solarmodulen

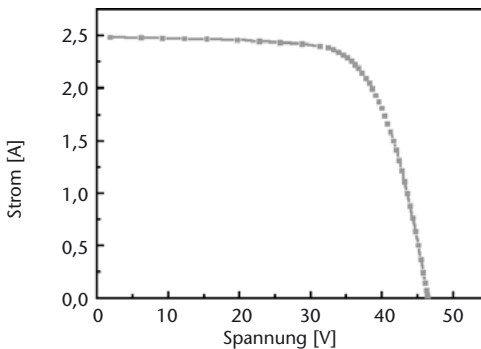
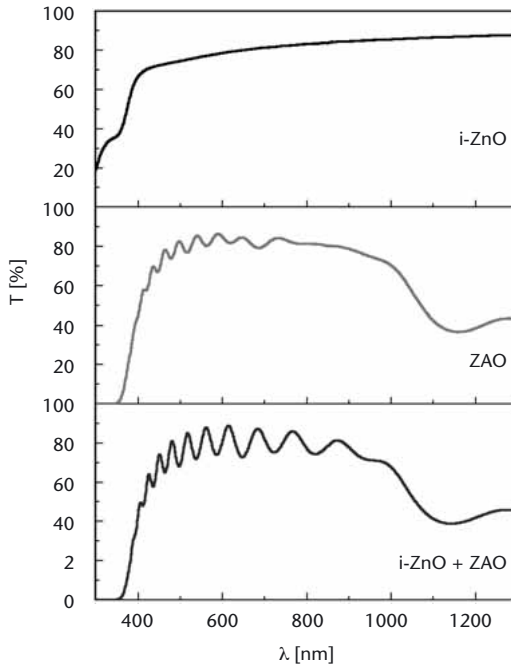


Abbildung 3b  
Typische Kennlinie eines  $120 \times 60 \text{ cm}^2$  großen CIGS-Moduls;  
Elektrische Kenndaten:  
 $\eta = 12.14 \%$ ;  
 $P_{MAX} = 80.38 \text{ W}$ ;  
 $FF = 69.9 \%$ ;  
 $V_{OC} = 46.34 \text{ V}$ ;  
 $I_{SC} = 2.48 \text{ A}$

Wie schon erwähnt wird als TCO-Material Zinkoxid in einer Doppelschicht eingesetzt. Auf die Pufferschicht aus CdS wird zunächst eine dünne undotierte ZnO-Schicht (i-ZnO) aufgebracht. Darauf wird eine mit Aluminium dotierte ZnO-Schicht (ZAO) abgeschieden. Die Herstellungsverfahren beider Schichten sind unterschiedlich. So wird das i-ZnO mittels RF-Sputtern und das ZAO mittels DC-Sputterverfahren vom keramischen Target bei hohen Leistungsdichten hergestellt. Die Abscheidungen erfolgen in einer Durchlauf-Sputteranlage mit einer Beschichtungsbreite von 60 cm und ohne aktives Heizen.

Abbildung 4  
Transmissionskurven  
von ZnO-Schichten



Mit optimierten Herstellbedingungen werden für die CIGS-Zelle gute TCO-Eigenschaften erreicht ( $R_{sq}$  auf Glas = 5-8 Ohm,  $T_{max} = 86-89\%$ ,  $T_{400-800\text{ nm}} = 74-79\%$ , Beweglichkeit = 18-22  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ , Ladungsträgerkonzentration =  $3-5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ). In *Abb. 4* sind die Transmissionsverläufe über die Wellenlänge für die Einzelschichten und die Doppelschicht (i-ZnO, ZAO, i-ZnO+ZAO) dargestellt.

Neben den opto-elektronischen Eigenschaften ist die Feuchte-Wärme-Stabilität (Damp-Heat-Test, 85 °C @ 85 % rel.F.) der ZAO-Schichten eine sehr wichtige Eigenschaft. Untersuchungen an ZAO-Schichten, die auf das Schichtpaket abgeschieden wurden, zeigen je nach Herstellungsverfahren (Reaktivprozess vs. keramischer Prozess) ein unterschiedliches Stabilitätsverhalten (*Abb. 5*).

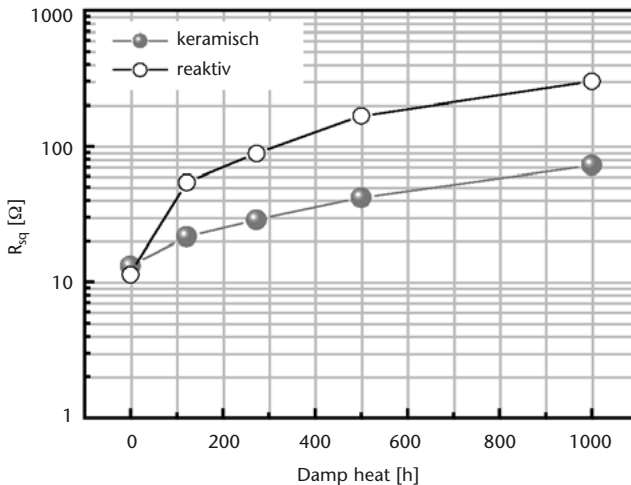


Abbildung 5  
Abhängigkeit des ZAO-Flächenwiderstandes auf CIGS-Absorber (im unverkapselten Zustand) von der Damp-Heat Zeit bei unterschiedlichen Herstellungsverfahren (reaktiv vs. keramischer Sputterprozess)

Aufgrund des Widerstandsanstieges bei Feuchte-Wärme-Einfluss ist eine zusätzliche aufwändige Verkapselung notwendig, um die Module gegen Umwelteinflüsse zu schützen.

In Hinblick auf die Kostenreduktion spielt neben der besseren Damp-Heat-Stabilität (geringere Schichtdicke möglich) auch der Einsatz neuartiger „Sintertargets“, welche wesentlich billiger in ihrer Herstellung sind als die bisher verwendeten „HIP-Targets“, eine wichtige Rolle. Hier wurden schon erste Versuche durchgeführt, in denen sich allerdings zeigte, dass besondere Anforderungen an die Prozessführung notwendig sind, um auch bei hohen Leistungsdichten noch stabil arbeiten zu können.

Der Sputterprozess mit keramischen Zinkoxid-Targets ist aus produktionstechnischer Sicht ein sehr robuster und reproduzierbarer Prozess, was sich z. B. in der Prozessausbeute von über 98 % widerspiegelt. Aus diesem Grund wird auch in Zukunft auf den Einsatz von keramischen ZAO-Targets gesetzt.