



# Pilotproduktion von CIS-Dünnschichtsolarmodulen: Status und TCO-Aspekte

## 1. Einleitung

Rolf Wächter,  
Michael Powalla  
ZSW  
rolf.waechter@zsw-bw.de

Bernhard Dimmler  
Würth Solar GmbH &  
Co. KG  
Reinhold-Würth-Straße 4,  
71672 Marbach am Neckar  
bernhard.dimmler@  
we-online.de

Nach langjährigen und erfolgreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am Institut für Physikalische Elektronik (IPE) der Universität Stuttgart und am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), bei denen die industrielle Fertigung von Dünnschichtsolarmodulen auf der Basis des Absorbermaterials  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  (CIS) durch Aufklärung der physikalischen und technologischen Grundlagen schrittweise vorbereitet wurde, ist nun die Schwelle zur Serienfertigung von CIS-Modulen erreicht.

Die Firma Würth Solar GmbH & Co. KG hat im Jahre 2000 eine Pilotfertigung für CIS-Solarstrommodule in Marbach a. N. in Betrieb genommen. Diese Linie mit einer Jahreskapazität von ca. 1  $\text{MW}_p$  (10.000  $\text{m}^2$ ) ist die Vorstufe für eine Serienfertigung mit mindestens zehnfachem Produktionsvolumen.

Wegen der verschiedenen vorteilhaften Merkmale der CIS-Dünnschichttechnik sind bei großen Produktionskapazitäten Herstellkosten zu erwarten, die wesentlich unter den heutigen Kosten für konventionelle kristalline Siliziummodule liegen werden.

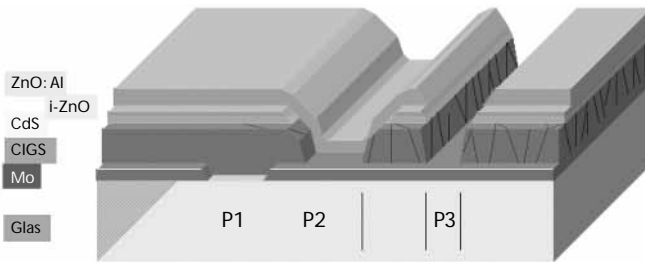


Abbildung 1  
Schichtaufbau eines CIS-Solarmoduls mit monolithischer Verschaltung

## 2. CIS-Solarmodulfertigung bei Würth Solar

Der Aufbau eines CIS-Solarmoduls ist schematisch in *Abb. 1* dargestellt. Auf einem Glassubstrat der Größe 60 cm x 120 cm befindet sich ein Schichtsystem aus Mo-Rückkontakt, CIS-Absorberschicht, einer dünnen Pufferschicht aus CdS und einer Fensterschicht aus undotiertem und Al-dotiertem ZnO.

Diese Fensterschicht dient nicht nur als Frontkontakt (TCO), sondern bildet gleichzeitig einen Teil des Heteroübergangs. Durch drei in den Schichtaufbau integrierte Strukturierungsschritte (P1-P3) wird das Modul in einzelne Zellen unterteilt und gleichzeitig die einzelnen Zellen verschaltet, indem jeweils der ZnO-Frontkontakt einer Zelle monolithisch mit dem Mo-Rückkontakt der nächsten Zelle verbunden wird.

Bis auf die CdS-Pufferschicht werden alle Schichten des Moduls in Vakuum-Durchlaufanlagen (inline-Prozessierung) mit einer Beschichtungsbreite von 60 cm aufgebracht. Dieses Verfahren ermöglicht durch kontinuierliche Beschichtung einen hohen Durchsatz und gleichzeitig einen hohen Automatisierungsgrad. Die erzielbare Schichthomogenität

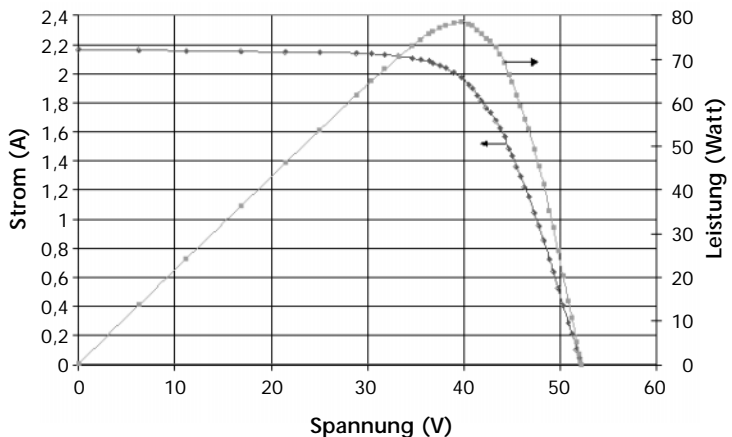
ist ebenfalls gut; in Durchlaufrichtung ist sie schon prinzipbedingt gegeben. Die CIS-Absorberschicht wird dabei durch simultanes thermisches Verdampfen der Einzelelemente in Linienquellen aufgebracht; Mo und ZnO werden durch Kathodenzerstäubung (Sputtern) abgeschieden. Neben der Standard-Solarmodulgröße von 60 cm x 120 cm werden durch entsprechende Strukturierung und späteres Schneiden auch Module in anderen, z. T. kundenspezifischen Größen produziert. Durch Laminieren mehrerer Module auf ein gemeinsames Frontglas können auch größere Module hergestellt werden.

### 3. Aktueller Stand der Pilotproduktion

Die Markteinführung der bei Würth Solar gefertigten CIS-Module startete in kleinen Stückzahlen mit Beginn des Jahres 2001. Gleichzeitig wurden die einzelnen Prozesse weiter optimiert. Im Jahr 2002 konnten die Ausbeute, die produzierte Stückzahl und die Qualität der Solarmodule simultan gesteigert werden. Nachdem der durchschnittliche Aperturwirkungsgrad bei einer Standard-Solarmodul-

Abbildung 2  
I/U-Kennlinie des  
bisläng besten Würth-  
Solar-CIS-Moduls  
(60 cm x 120 cm)

- $V_{oc}$  = 52,2V
- $I_{sc}$  = 2,16 A
- FF = 69,7 %
- $\eta_{Apert.}$  = 11,8 %
- $A_{Apert.}$  = 6623 cm<sup>2</sup>
- $P_{max}$  = 78,3W



grösse von 60 cm x 120 cm im Jahr 2001 noch bei 8,5–9 % lag, hat er inzwischen fast 10 % erreicht, wobei einzelne Module schon Werte von nahezu 12 % aufweisen (Abb. 2).

Seit 2001 wurden schon CIS-Module mit einer Gesamtleistung von mehreren 100 kW<sub>p</sub> in PV-Systemen unterschiedlicher Art (Schrägdach, Flachdach, Fassade, freistehend, ...) installiert. Einige Beispiele sind in den Abb. 3 bis 5 zu sehen.



Abbildung 3  
CIS-Fassadenmodule am  
Solarturm Heilbronn  
(160 Module, ca. 8 kW<sub>p</sub>)



Abbildung 4  
CIS-PV-Anlage  
„Schule Rotbäumlesfeld  
Ludwigsburg“  
(290 Module,  
ca. 17 kW<sub>p</sub>)

Abbildung 5  
Installation „Würth  
Elektronik Waldenburg“  
mit nachgeführten  
Modulen zur Energiege-  
winnung und Verschät-  
tung (80 Module 115 cm  
x 120 cm, ca. 8 kW<sub>p</sub>)



## 4. TCO-Abscheidung bei Würth Solar

Als transparenter Frontkontakt wird bei den CIS-Modulen ein Zweischichtsystem aus ca. 50 nm intrinsischem ZnO (i-ZnO) und ca. 1  $\mu\text{m}$  Al-dotiertem ZnO (ZAO) eingesetzt. Diese Schichten werden in einer Durchlaufsputteranlage mit 60 cm Beschichtungsbreite mittels RF- bzw. DC-Sputtern vom keramischen Target abgeschieden. Zur Erhöhung der Abscheiderate wird dafür beim ZAO ein Doppeltarget eingesetzt. Da das ZnO als letzte Schicht des Solarmoduls aufgebracht wird, muss die Substrattemperatur in diesen Sputtervorgängen unter 250 °C gehalten werden, um den CIS-Heteroübergang nicht zu schädigen.

Als mögliche Alternative zum Sputtern vom keramischen ZAO-Target wird gemeinsam mit dem ZSW und einem Anlagenhersteller die ZAO-Abscheidung im reaktiven Modus vom metallischen Zn:Al-Target weiterentwickelt. Trotz des erhöhten technischen Aufwands, der zur Kontrolle des Reaktivprozesses notwendig ist, kann hierbei durch die Verwendung billigerer metallischer Sputtertargets eine Kosteneinsparung erreicht werden.

## 5. Zusammenfassung

Die am ZSW auf der Grundlage der Forschungsarbeiten des IPE entwickelten Prozesse zur industriellen Fertigung von CIS-Solarmodulen wurden von Würth Solar erfolgreich in eine Pilotproduktion umgesetzt. Die einzelnen Prozesse laufen reproduzierbar; sowohl Ausbeute als auch Stückzahl konnten im laufenden Jahr deutlich gesteigert werden. Die gefertigten Module erreichen durchschnittliche Wirkungsgrade um 10 % bei einer Größe von 60 cm x 120 cm.

Als TCO wird eine Doppelschicht aus i-ZnO und ZAO eingesetzt, die mittels RF- bzw. DC-Sputtern vom keramischen Target aufgebracht wird. Als kostengünstigere Alternative ist für das ZAO ein Reaktivsputterprozess vom metallischen Target in Entwicklung.

