

CIS- Dünnschichtsolarmodule

Überblick:

Vor ca. 20 Jahren begann die Entwicklung von CIS-Dünnschichtsolarzellen an der Universität Stuttgart. Die lichtabsorbierende Schicht besteht bei diesem Solarzellentyp aus den Elementen Kupfer (Cu), Indium (In), Gallium (Ga) und Selen (Se) (kurz CIS oder CIGS). Im Labor konnten auf kleinen Flächen (< 1 cm²) Wirkungsgrade über 18% demonstriert werden. Nachdem dieses hohe Wirkungsgradniveau, das erstmals Dünnschichtsolarzellen in die Region der polykristallinen Silizium-Wafertechnologie brachte, erreicht war, begann vor 6 Jahren die Umsetzung dieser Technologie auf größere Flächen mit industriellen Herstellungsverfahren am Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung (ZSW), Stuttgart. Ein wichtiger Meilenstein der Entwicklung war, daß es gelang die Ko-Verdampfung der Einzelelemente im Hochvakuum auf große Flächen in einem industriellen Durchlaufprozess zu realisieren. Am ZSW wurden 30 cm x 30 cm große CIS-Solarmodule mit Spitzenwirkungsgraden von knapp 13% und mittleren Wirkungsgraden von über 11% hergestellt. In einem zweiten Schritt wurden die Herstellungsprozesse auf die Größe 120 cm x 60 cm aufskaliert. Mitte des Jahres 2000 ging bei der Firma Würth Solar eine Pilotproduktion für CIS-Module nach dem ZSW-Verfahren in Betrieb.

1. Einleitung

Solar erzeugte elektrische Energie kann in netzfernen Anwendungen heute mit konventioneller Energie konkurrieren. Insbesondere für netzgekoppelte Anwendungen ist aber eine drastische Kostenreduktion zur massiven Markteinführung erforderlich. Dünnschichtsolarmodule haben langfristig ein sehr hohes Kostenreduktionspotenzial. Dünnschichttechnologie bedeutet, dass kostengünstige Träger (z. B. Fensterglas) mit den elektrisch aktiven Materialien (Schichtdicken nur einige tausendstel

Millimeter!) im Quadratmetermaßstab beschichtet werden. Besonders hervorzuheben ist das hohe Kostenreduktionspotenzial und die Wirtschaftlichkeit durch:

- großflächige automatisierbare Herstellungsverfahren
- hohes Wirkungsgradniveau und hohe Lebensdauer
- geringen Material- und Energieeinsatz
- geometrisch und elektrisch anpassbare Modulformen für:
 - einfache Geräte- und Gebäudeintegration
 - Kleinst- und Großflächenanwendungen
- hohe Strahlungsresistenz bei Weltraumanwendungen [1]

2. Dünnschichtsolarzellen

Unter den derzeit industriell relevanten Dünnschichttechnologien, basierend auf den Halbleitermaterialien amorphes Silizium (a-Si) [2], Kadmiumtellurit (CdTe) [3] oder Kupferindiumdiselenid (CIS oder CIGS), hat die CIS-Technologie mit knapp 19% für Solarzellen das höchste Wirkungsgradpotenzial. Durch intensive Entwicklungen konnte die Qualität in der Vergangenheit immer mehr gesteigert werden (Abb. 1).

Für Module liegen die Spitzenwirkungsgrade aufgrund von Verschaltungsverlusten und technologisch bedingten Inhomogenitäten, etwas niedriger. In Tab. 1 sind die aktuellen Spitzenwirkungsgrade von CIS-Modulen nach der Größe sortiert aufgelistet. Die Spitzenwirkungsgrade für Module haben inzwischen Werte erreicht, die durchaus mit Werten von polykristallinem Silizium aus der Produktion vergleichbar sind. Für die Zukunft ist wichtig, daß auch gezeigt wird, daß unter industriellen Randbedingungen und hohen Stückzahlen dieses Qualitätsniveau mit hoher Ausbeute gehalten werden kann.

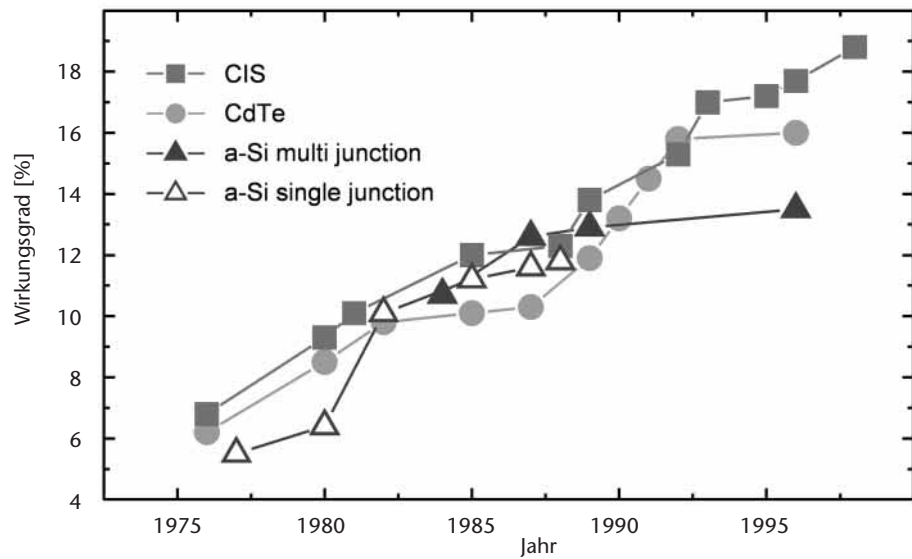
Dr. M. Powalla
ZSW
powalla@zsw-bw.de

Dipl.-Ing.
Bernhard Dimmler,
Dipl.-Ing.
Karl-Heinz Groß
Würth Solar GmbH
Ludwigsburgerstr. 100
D-71672 Marbach
am Neckar
bernhard.dimmler@we-online.de

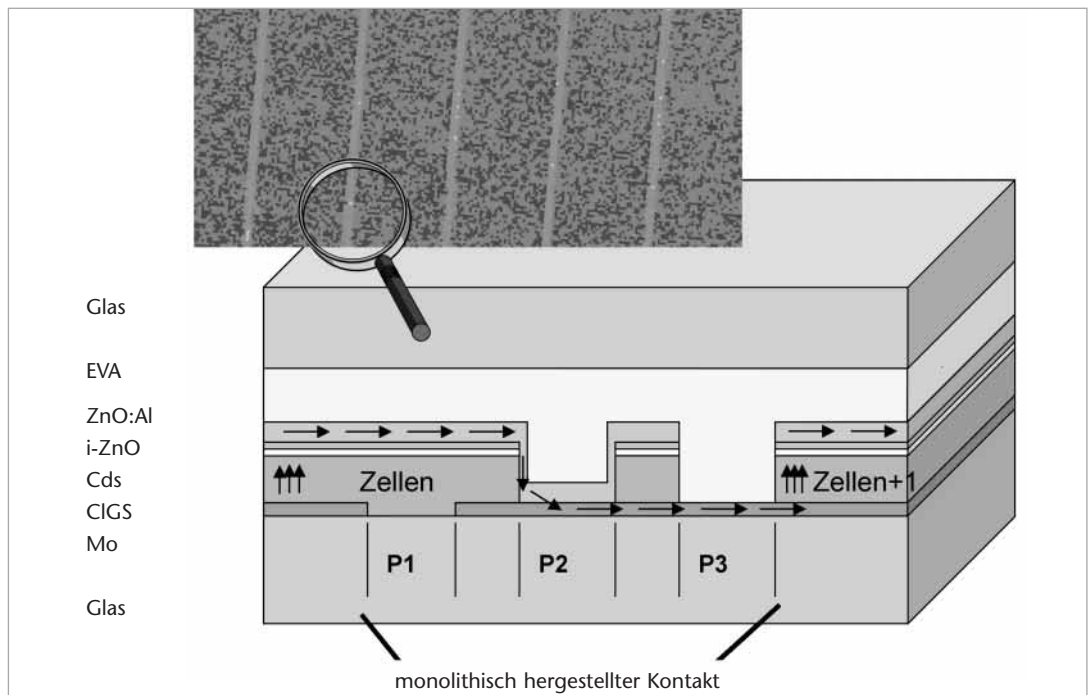
*Tabelle 1
Spitzenwirkungs-
grade von CIS-
Modulen (Zeile 1:
Zellwirkungsgrad).*

Material	Modulfläche [cm ²]	Wirkungsgrad [%]	Jahr	Labor/Firma	Bemerkung
CIGS	(16,1)	1998	ZSW [4]	Industrielle Prozesse	
CIGS	14	15,1	2000	ZSW	0,25 mm Substrat
CIGS	16	16,6	2000	ÅSC (S) [5]	Labor batch
CIGS	18,9	14,7	1999	Siemens [6]	Selenisierung
CIGS	736	12,7	1999	ZSW [4]	Ko-Verdampfung
CIGSeS	864	12,5	2000	Showa Shell (J) [7]	Selenisierung, Cd-frei
CIGSeS	3651	12,1	1999	Siemens (USA) [8]	Selenisierung

*Abbildung 1
Entwicklung der
Wirkungsgrade von
Dünnschichtsolarzellen
aus CIS, CdTe, a-Si im
Labormaßstab welt-
weit.*



*Abbildung 2
Draufsicht und
Prinzipschnittbild von
CIS-Dünnschichtso-
larmodulen. Durch die
in den Herstellungs-
prozeß integrierten
Strukturierungspro-
zesse (P1, P2, P3)
wird eine elektrische
Serienverschaltung
der Einzelzellen,
die als ca. 6 mm breite
Streifen ausgeführt
werden, realisiert.
(EVA: Verkapselungs-
masse)*



3. Aufbau von CIS-Dünnschichtsolarmodulen und Technologie

Für die Herstellung einer CIS-Solarzelle werden insgesamt fünf verschiedene Schichten nacheinander aufgebracht. Diese Schichten werden mehrfach strukturiert, so daß einzelne Zellen elektrisch in Serie verschaltet werden und ein photovoltaischer Generator mit wählbarer Ausgangsspannung entsteht. Schließlich werden an den zwei äußeren Zellen Kontakte montiert und das Rohmodul zum Schutz vor Umwelteinflüssen mit einem Deckglas versiegelt. Das Endprodukt entsteht somit vom Rohglas bis zum fertigen Solarmodul in einem geschlossenen Fertigungsablauf. In *Abb. 2* ist der Schnitt durch ein CIGS-Modul gezeichnet. Beispielhaft ist die serielle Verschaltung zweier Einzelzellen, die in der Regel ca. 6 mm breit sind, schematisch dargestellt. Die Gesamtdicke der Schichten beträgt nur etwa 4 µm. Die einzelnen Fertigungsschritte sind in ihrer Reihenfolge in *Tab. 2* aufgelistet.

Am ZSW wurden zur Herstellung der Halbleiterschicht Cu(In,Ga)Se₂-Schicht und der Kontaktschichten (Mo, ZnO:Al) Durchlaufverfahren (Fließbandbeschichtung) entwickelt. Im Falle der Sputtertechnik konnte auf kommerziell erhältliche Komponenten zurückgegriffen werden. Hingegen wurden zur Realisierung der großflächigen thermischen Ko-Verdampfung von CIGS Linienverdampferquellen neu entwickelt. Das Prinzip ist in *Abb. 3* dargestellt. Die Strukturierung zur Verschaltung der Zellen

Prozessschritt	Beschreibung Standardverfahren
Substrat	Fensterglas 2-4 mm, Reinigung, Zuschnitt, Kantenbearbeitung
Substratvorbehandlung	
Rückkontaktbeschichtung	DC-Magnetron-Sputtern von Molybdän
Rückkontaktstrukturierung	ND-YAG ¹ -Laserstrukturierung
CIS-Abscheidung	Thermisches Ko-Verdampfen im Durchlaufverfahren
CdS-Abscheidung	Chemische Badabscheidung von CdS
Halbleiterstrukturierung	Mechanisches Entfernen von CIS/CdS zur Freilegung von Mo
Fensterpräparation	ZnO Doppelschicht bestehend aus RF-gesputtertem i-ZnO und DC gesputtertem ZnO:Al im Durchlaufverfahren
Fensterstrukturierung	Auftrennung der Fensterschicht durch mechanisches Ritzen
Modulpräparation	Kontakte, Glas-Glas-Lamination
Test	Kennlinientest der Einzelmodule

¹ND-YAG = Neodym-Ytterbiumaluminiumgranat

zum Modul erfolgt mit einem vollautomatisierten x-y-Tisch, wobei entweder mit einem Nd-YAG-Laser oder einem mechanischem Meißel gearbeitet wird. Die Abscheidung der CdS-Schicht erfolgt in einem chemischen Bad.

Tabelle 2
Prozessschritte für CIS-Module

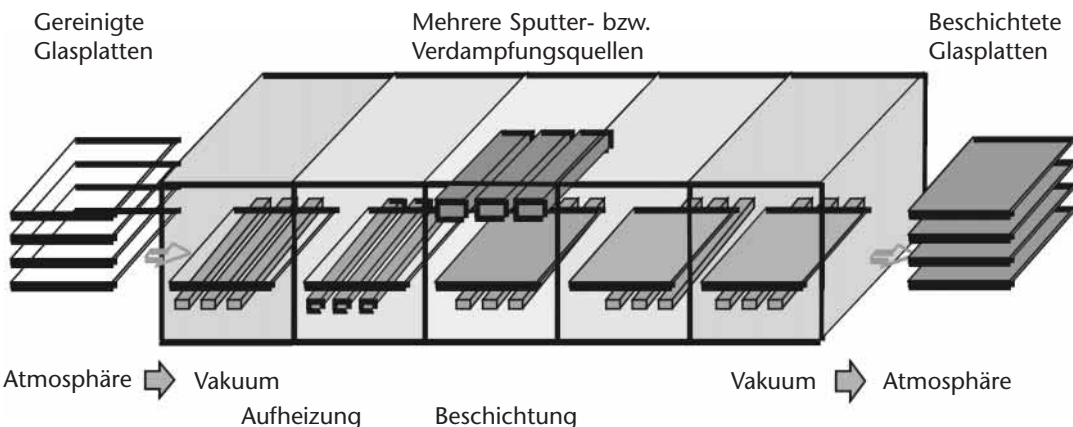


Abbildung 3
Anlagendesign: Zur Herstellung von CIGS, Mo und ZnO-Schichten wurden am ZSW Prozesse mit kontinuierlichem Substrattransport entwickelt.

Tabelle 3
Ausbeute bei der ZSW Versuchsfertigung und Spezifikation nach verschiedenen Klassen

	Spezifikation, Wirkungsgrad [%]	Anzahl der Module	Ausbeute [%]
Klasse A	10 bis 13	63	74,1
Klasse B	8 bis 10	12	14,1
Klasse C	0 bis 8, keine sichtbaren Fehler	2	2,4
Klasse D	gebrochen oder zerkratzt	8	9,4

Abbildung 4 ↓
Wirkungsgradverteilung der ZSW Versuchsfertigung. Es wurden 108 Module (30 cm x 30 cm) ohne Unterbrechung gefertigt. Die Wirkungsgrade wurden vor der Verkapselung vermessen.

4. Eigenschaften von CIS-Dünnschichtsolarmodulen

Im Labor wurden Wirkungsgrade bis knapp 19% nachgewiesen. Kleine Module mit mehreren monolithisch verschalteten Zellen wurden mit verschiedenen Herstellungsverfahren mit 14 bis 17% im Technikummaßstab produziert. Wirkungsgrade bis knapp 13% für 30 cm x 30 cm Module wurden am ZSW demonstriert.

in verschiedene Klassen, wie in Tab. 3 gezeigt, eingeteilt. Über 88% der Module hatten einen Wirkungsgrad größer als 8%, was die hohe Reproduzierbarkeit der Halbleiterprozesse demonstriert. Vermeidbare Fehler kamen hauptsächlich bei der Glasbearbeitung vor, die am ZSW manuell ausgeführt wird. Abb. 4 veranschaulicht die Prozessstatistik der ZSW Versuchsfertigung. Der Mittelwert der hergestellten Module mit Wirkungsgraden größer als 8% lag bei 11%. Die Prozeßausbeute der Halbleiterprozesse, insbesondere auch der CIS-Ko-Verdampfung, lag bei deutlich über 90%.

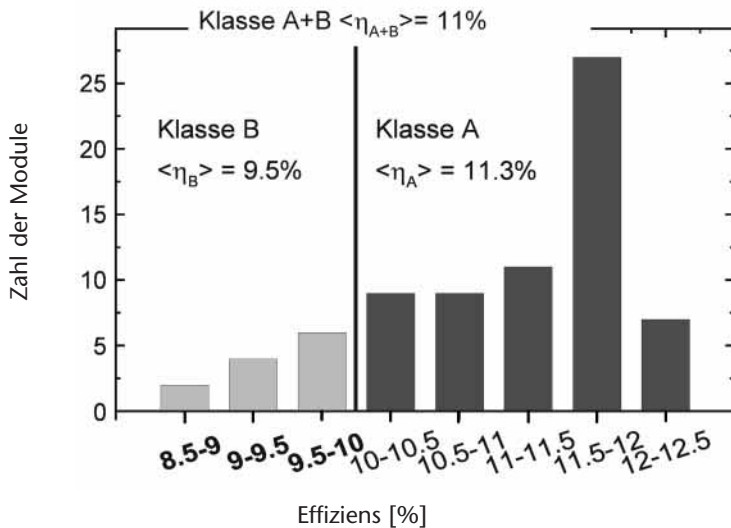
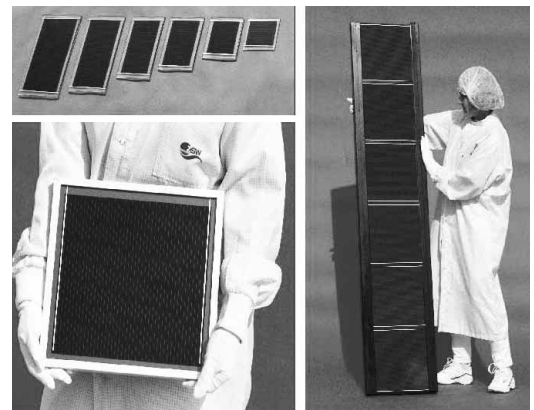


Abbildung 5 →
Beispiele einiger kundenspezifischer CIS-Module.

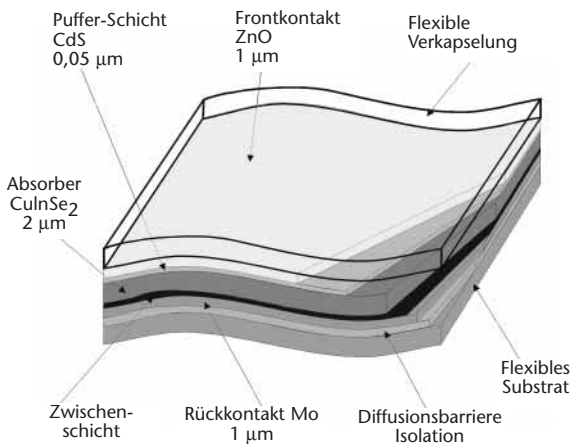
In der Fertigung erwartet man Wirkungsgrade von 10 bis 12%. Am ZSW erfolgte eine Versuchsfertigung von 30 cm x 30 cm Modulen, um eine hohe Prozeßstabilität nachzuweisen. Es wurden 108 Module ohne Unterbrechung gefertigt. Die Module wurden anschließend

In Abb. 5 sind einige Beispiele der am ZSW hergestellten Module gezeigt. Die Module können in weiten Bereichen sowohl geometrisch als auch elektrisch dem Produkt angepasst werden. Mit beschleunigten Alterungstests und Feldtests kann gezeigt werden, daß CIS-Module, die nach dem ZSW-Verfahren hergestellt wurden, auch unter diversen Umweltbedingungen stabil sind.



5. Innovationen

Neben dem Basisprozeß der Module, die als Glas/Glas-Laminat ausgeführt werden, gibt es Neuentwicklungen, bei denen das Glassubstrat durch flexible und/oder extrem leichte Materialien ersetzt werden soll. Das Trägermaterial besteht dann aus einer Kunststoffolie oder aus Metallfolien. Dies hat zum einen den Vorteil daß mit "Rolle-zu-Rolle"-Beschichtungsverfahren die Herstellungskosten weiter gesenkt werden können, zum anderen können neue Anwendungen für die Photovoltaik (PV) erschlossen werden.



In Abb. 6 ist ein Prinzipbild eines flexiblen Moduls gezeigt. Um eine elektrische Verschaltung der Einzelzellen auf einem leitfähigen Substrat zu ermöglichen, muß zunächst eine elektrisch isolierende Schicht auf das Substrat aufgebracht werden [9]. Im Falle von Kunststoffolien muß die maximale Depositionstemperatur bei der CIGS-Abscheidung von 550°C deutlich gesenkt werden. In der Entwicklung sind auch Verkapselungsverfahren wie Folien- oder Lackverkapselung für flexible Module. Wichtig zur Verschaltung der Module ist, daß die Substrate keine zu große Rauigkeit aufweisen, da sonst Kurzschlüsse in der Zelle und bei der Verschaltung entstehen. Die mechanische Strukturierung muß durch Laserstrukturierung oder fotolithografische Methoden ersetzt werden.

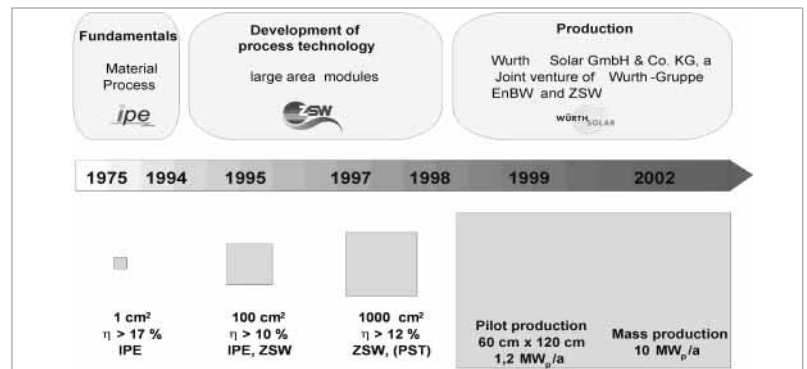
Auf Metallfolien wurden am ZSW erste Zellen mit bis zu 13% Wirkungsgrad hergestellt, bei denen es auch gelungen ist, eine serielle elektrische Verschaltung monolithisch zu realisieren.

6. Umsetzung der CIS-Technik in eine industrielle Fertigung

Historische Entwicklung

Bereits seit den siebziger Jahren ist am Institut für Physikalische Elektronik der Universität Stuttgart (IPE) begonnen worden, Materialien hinsichtlich ihrer Eignung für Dünnschicht-Solarzellen zu erforschen und Verfahren zu ihrer Herstellung zu erarbeiten. Seit den frühen achtziger Jahren wird das Materialsystem Cu(In,Ga)(Se,S)₂ intensiv untersucht. Nach erfolgreicher Entwicklung der Technologie im Labor wurde diese Technik auf Module mit Größen bis 30 cm x 30 cm Anfang der neunziger Jahre an das ZSW transferiert und für eine kommerzielle Fertigung weiterentwickelt. Im Jahre 1998 konnte erstmalig ein Modulwirkungsgrad von über 10% realisiert werden, der inzwischen auf nahezu 13% gesteigert werden konnte. Schwerpunkte der Arbeiten am ZSW waren die Entwicklung einer großflächigen Beschichtungstechnik, die Optimierung fertigungsrelevanter Randbedingungen wie Reproduzierbarkeit bzw. Prozeßausbeute sowie die Entwicklung der Modultechniken von der elektrischen Verschaltung durch entsprechende Strukturierungsschritte bis zur Verkapselung. Im Jahre 1998 entschied die Unternehmensgruppe WÜRTH, die Technik des ZSW aufzugreifen

Abbildung 6 Prinzip eines flexiblen Moduls.



und zunächst in einer Pilotlinie weiterzuentwickeln. In der ersten Phase wird die Technik auf Modulgrößen bis 60 cm x 120 cm erweitert. In der zweiten Phase werden die Prozesse soweit optimiert, daß schrittweise in einen Fertigungsbetrieb übergegangen werden kann. Die zeitliche Entwicklung der Aufskalierung ist in Abb. 7 veranschaulicht.

Abbildung 7 Entwicklungsszenario für CIS-Dünnschichtsolarmodule in Baden-Württemberg

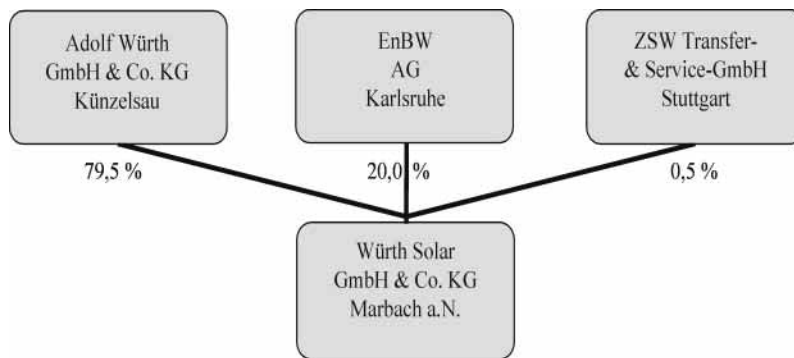


Abbildung 8
Unternehmensstruktur
der Würth Solar
GmbH & Co. KG.

Die kommerzielle Herstellung und der Vertrieb von CIS-Modulen mit hohen Qualitäts- und Zuverlässigkeitsstandards ist für die zweite Jahreshälfte 2000 geplant. Wenn alle technischen Randbedingungen in der Pilotlinie geklärt sind, wird der Aufbau einer Massenfertigung rasch erfolgen. Es ist davon auszugehen, daß ab August 2000 CIS-Module aus Marbach am Neckar vertrieben werden. Das Unternehmen Würth Solar GmbH & Co. KG als Tochterunternehmen der Adolf Würth GmbH & Co. KG mit Beteiligung der EnBW AG, des größten baden-württembergischen Energieversorgungsunternehmens und des ZSW wurde im Frühjahr 1999 mit dem Zweck gegründet, die CIS-Technik in die Massenfertigung zu überführen, CIS-Module herzustellen und zu vertreiben. In Abb. 8 ist die Unternehmensstruktur der Würth Solar GmbH & Co. KG dargestellt. Die Prozentangaben beziehen sich auf die jeweiligen Anteile am Unternehmen.

Die Produktionslinie wurde in ein stillgelegtes Kraftwerk der EnBW in Marbach am Neckar bei Stuttgart integriert.

In Abb. 9 ist in einer 180°-Ansicht das ehemalige Turbinen/Generatoren-Haus des Kraftwerkes und die CIS-Fertigungsstätte von außen zu sehen. Die eigentliche Rohmodulfertigung ist in einem Reinraum mittlerer Klasse im gegenüberliegenden Teil in Bildmitte untergebracht, Montage und Test der verkapselten Module befinden sich hinter der Fassade im rechten Bildausschnitt. Infrastruktur und Lagerbereiche gliedern sich in den Ebenen darunter bzw. darüber.

Stand und Perspektiven

Grundsätzlich wurden die Technologien wie sie am ZSW für die Herstellung von CIS-Modulen angewandt werden (vgl. Kap. 3) weitgehend übernommen. Alle Prozessschritte wurden für eine Modulgröße von 60 cm x 120 cm ausgelegt. Sämtliche Beschichtungsprozesse wurden im sogenannten Inline-Verfahren konzipiert und umgesetzt. Alle Schritte vom Glaswaschen bis zum verkapselten Modul sind automatisiert und teilweise jetzt schon miteinander verknüpft. Mit diesem Konzept soll ein in sich geschlossener und automatisierter Betrieb unter realistischen Fertigungsbedingungen gefahren werden, um die technischen Randbedingungen für die erfolgreiche Überführung in die Massenfertigung mit einer Jahreskapazität im "Zig-Megawatt"-Bereich endgültig zu klären. Nach der Konzeptions- und Planungsphase im 1. Halbjahr und Baubeginn im August 1999 konnten die ersten Fertigungsanlagen bereits im Dezember installiert werden. Im Laufe des ersten Quartals 2000 wurde die Anlagentechnik vervollständigt und in Betrieb genommen. Im Mai wurden die ersten vollständigen Prozesssequenzen gefahren. Im Augenblick sind alle Prozess-

Abbildung 9
180°-Ansicht der
Maschinenhalle des
stillgelegten
Dampfkraftwerkes der
EnBW in Marbach am
Neckar mit der darin
integrierten CIS-
Pilotfertigung von
Würth Solar.



schritte für sich und in der Verkettung in der ersten Optimierungsphase. Die ersten funktionsfähigen Module werden im Juli hergestellt werden, so daß die ersten Serien mit Qualität voraussichtlich im August 2000 vom Band laufen können. Der angestrebte Modulwirkungsgrad ist für das Jahr 2000 mindesten 8%; für die Fertigung im Jahr 2001 wird der mittlere Modulwirkungsgrad voraussichtlich auf über 10% steigen. Neben der Produktqualität und –zuverlässigkeit stehen zunächst die Optimierung der Prozeßausbeuten und Geschwindigkeiten im Vordergrund. Das Produktspektrum wird neben Standardmodulen mit den Maßen bis 60 cm x 120 cm vor allem kundenspezifische Lösungen mit in Geometrie und elektrischen Kenndaten produktangepassten Designs umfassen. Erste Prototypen wurden bereits in Zusammenarbeit mit dem ZSW hergestellt. Die ersten Qualifizierungen sind bereits erfolgreich abgeschlossen. Weitere Kooperationen mit Produktherstellern werden angestrebt. Der Vertrieb von Standardmodulen wird über die Würth Solergy, ein Tochterunternehmen der Würth Elektronik, als Systemlieferant ebenfalls aus Marbach a.N. abgewickelt werden. Kundenspezifische Lösungen werden vorläufig über die Würth Solar selbst vertrieben werden. Wann die Entscheidung für den Start der Massenfertigung fallen wird, wird vom Fortschritt der Technik der Pilotlinie abhängen. Das bisherige Konzept der schrittweisen Skalierung der Technik wird beibehalten werden, um die Markteinführung und Etablierung der CIS-Technik auf dem PV-Markt als die im Augenblick aussichtsreichste Zukunftsoption für den Massenmarkt erfolgreich zu gestalten.

7. Danksagung

Die Autoren danken den CIS Teams am ZSW und bei Würth Solar. Die Arbeiten werden vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF), dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg und der Europäischen Kommission gefördert.

Literatur

- [1] A. Jasenek, U. Rau, K. Weinert, I.M. Kötschau, G. Hanna, G. Voorwinden, M. Powalla, H.W. Schock, J.H. Werner, to be published in Proc. of the E-MRS Conf. Straßburg (2000)
- [2] David E. Carlson, Technical Digest of the International PVSEC-11, (Tanaka Printing Co. Ltd., Kyoto, Japan, 1999), p. 29, to be published in Solar Energy Materials and Solar Cells (2000)
- [3] D. Bonnet, Thin Solid Films, edited by J. E. Greene, D. Lincot, A. Rockett, (Elsevier Science, New York, 361-362, 2000), p. 547
- [4] M. Powalla, B. Dimmler, Thin Solid Films, edited by J. E. Greene, D. Lincot, A. Rockett, (Elsevier Science, New York, 361-362, 2000), p. 540
- [5] J. Kessler, M. Bodegård, L. Stolt, to be published in Proc. of 16th European PVSEC, Glasgow, (2000).
- [6] Franz. H. Karg, Technical Digest of the International PVSEC-11, (Tanaka Printing Co. Ltd., Kyoto, Japan, 1999), p. 627, to be published in Solar Energy Materials and Solar Cells (2000)
- [7] Katsumi Kushiya, to be published in Proc. of the E-MRS Conf. Straßburg (2000)
- [8] Press Release Siemens Solar, 19.04.1999
- [9] F. Kessler, K. Herz, E. Gross, M. Powalla, K.-M. Baumgärtner, A. Schulz, J. Herrero, to be published in Proc. of 16th European PVSEC, Glasgow, (2000).