

# Perspektiven der Dünnschichttechnik

M. Powalla, Stuttgart

**Die Dünnschichtproduktion wächst deutlich schneller als die Waferproduktion, die heute und sicher auch in den nächsten Jahren als „Arbeitspferd“ der Photovoltaik bezeichnet werden kann. Ob die Dünnschicht-Technik die Si-Technik ablösen wird, bleibt abzuwarten.**

## 1 Einleitung

Bereits in den 1980er Jahren gab es deutliche Erfolge in der Entwicklung von Dünnschicht-Laborsolarzellen mit Wirkungsgraden über 8%. Dennoch gelang es erst ca. 20 Jahre später, Module in Masse zu fertigen. Die Schwierigkeiten einer schnellen Markteinführung lagen hauptsächlich darin begründet, dass gelernt werden musste, wie sich die Halbleiter großflächig und in ausreichender Qualität sowie Produktivität herstellen lassen. Die Industrie konnte nicht wie beim kristallinen Wafer-Silizium auf die Mikroelektronik-Technologie zurückgreifen, sondern musste lernen, „Makroelektronik“ zu betreiben – ein völlig neuer Ansatz, der bisher nur in der Flachbildschirmindustrie umgesetzt worden ist.

Ob die Dünnschicht-Technik die Si-Technik ablösen wird – wie z. B. die Flachbildschirme die Kathodenstrahlröhren –, bleibt abzuwarten. Tatsache ist, dass die Dünnschichtproduktion deutlich schneller wächst als die Waferproduktion, die heute und sicher auch in den nächsten Jahren als „Arbeitspferd“ der Photovoltaik bezeichnet werden kann.

### Autor

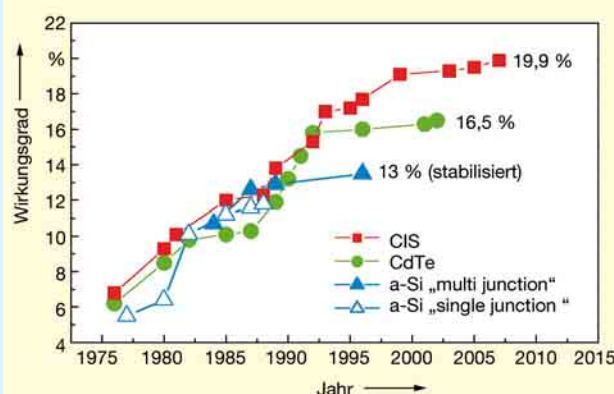
Dr. Michael Powalla arbeitet am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Stuttgart.

## 2 Solarzellentechnologien

Heute gibt es sehr unterschiedliche Solarzellenkonzepte, die sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden. Herkömmliche Solarzellen bestehen aus Silizium-Scheiben (Wafern) mit einer Dicke von ca. 200 µm. Die Si-Solarzelle ist ein „Spin-Off“ der Elektronikindustrie, die in den vergangenen 50 Jahren gelernt hat, Silizium sauber und damit solar-tauglich herzustellen. Andere Konzepte wie Farbstoffsolarzellen oder Solarzellen auf der Basis von organischen Halbleitern befinden sich noch im Forschungs- bzw. Pilotierungsstadium (Ankündigungen von Giga-Watt-Produktionen gibt es bereits). Die höchsten Wirkungsgrade, in der Forschung knapp über 40%, werden heute mit Konzentratorsolarzellen auf der Basis der III-V Hauptgruppenelemente (z. B. GaAs) erzielt. Da der Herstellungsprozess und auch der Betrieb sehr aufwändig sind, kommen solche Zellen nur für spezielle Anwendungen in Frage (im Weltraum oder terrestrisch, mit Lichtkonzentration und solarer Nachführung). Neben vielen Vorteilen besitzt Silizium einen großen Nachteil: Es lässt sich kristallin als dünne Schicht nur sehr schwer in ausreichender Qualität für eine klassische Si-p/n-Diode herstellen.

Um langfristig material- und energieeffiziente und vor allem kosteneffiziente Module produzieren zu können, haben die Dünnschichttechnologien das größte Potential. Dabei werden Halbleiter eingesetzt, die zwei Größen-

**1 Zellwirkungsgradrekorde aus dem Forschungslabor verdeutlichen das Potential der verschiedenen Dünnschichttechniken**



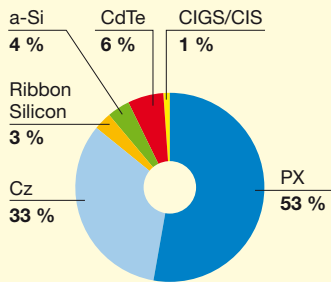
# Zukunft anstecken. Ertrag sichern.

Der neueste Fronius Wechselrichter zeigt wie. Auf der Intersolar 09, Halle B4, Stand B4.210

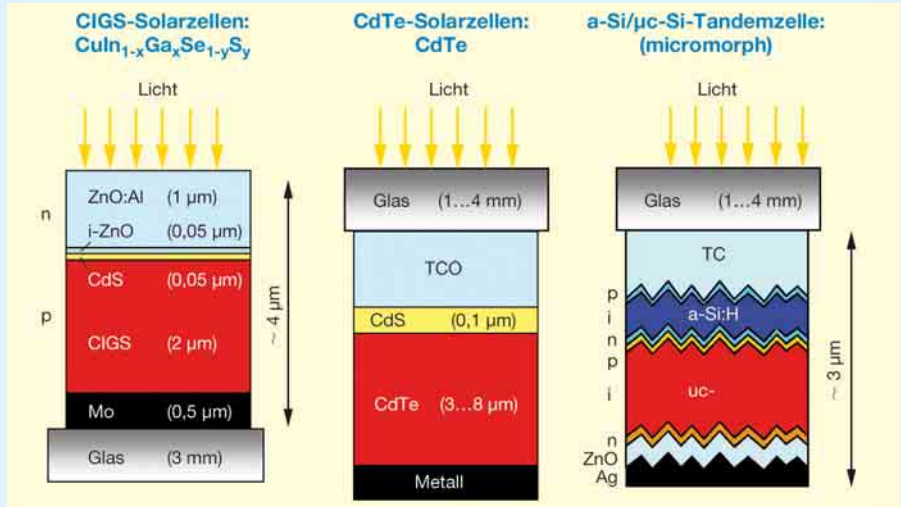
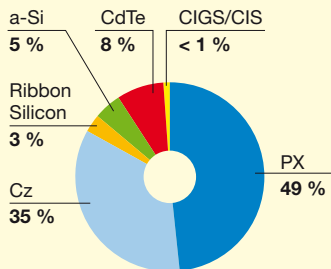


POWERING YOUR FUTURE

Marktanteil 2007: 3073,0 MWp



Marktanteil 2008: 5491,8 MWp



3 Dünnschichtsolarzellen im Substrataufbau (z. B. CIGS) bzw. Superstrataufbau (CdTe und a-Si)

2 Verteilung der am Markt befindlichen PV-Technologien für die Jahre 2007 und 2008 [2].

Die Si-Wafer-basierten Technologien (Cz, PX, Ribbon Silicon) hatten 2008 einen Marktanteil von 87%. **a-Si** amorphes Silizium; **CdTe** CadmiumTellurid; **CIGS** Kupfer und Indium verbunden mit Gallium und Selen; **CIS** Kupfer und Indium verbunden mit Schwefel oder Selen; **Cz** mit Czochralski-Prozess (Tiegelziehverfahren) hergestellte monokristalline Wafer; **PX** polykristalline Wafer; **Ribbon Silicon** bandgezogene Wafer

ordnungen weniger Materialeinsatz ermöglichen und als dünne Schichten (ca. 2 µm) aufgetragen werden. Folgende drei Materialklassen haben den Schritt in die Kommerzialisierung bereits hinter sich, sind also auch auf dem Markt präsent:

- die amorphe/mikrokristalline Siliziumtechnik,
- die Cd-Te-basierte Technik und
- die Kupfer-Indium-Selenid/Schwefel-Technik, kurz CIS.

Die im Labor erzielten Rekordwirkungsgrade der zurückliegenden drei Jahrzehnte sind in Bild 1 dargestellt und zeigen das Potential der jeweiligen Technologie auf. Mit knapp 20% stößt die CIS-Technik bereits in den Bereich der multikristallinen Si-Zellen vor. Trotz der deutlich niedrigeren Wirkungsgrade der kommerziell erhältlichen Module (5–12%) im Vergleich zu den Laborzellen-Maximalwerten (13–20%) konnte die Dünnschichttechnologie ihre Marktpräsenz von 8% im Jahr 2006 auf 14% 2008 ausbauen. Der Gesamtmarkt

wuchs im selben Zeitraum von knapp 2 GW<sub>p</sub> auf 5,5 GW<sub>p</sub>. Die Verteilung der am Markt befindlichen PV-Technologien zeigt Bild 2 [1]. Den größten Zuwachs hat die CdTe-basierte Technik zu verzeichnen, die ihren Anteil um 33% auf 8% steigern konnte. Für das Jahr 2009 wird eine Expansion der Produktion auf über 1 GW<sub>p</sub> erwartet [3].

3 Dünnschichttechnologien am Markt

Alle drei genannten Technologien haben gemeinsam, dass die photoelektrisch aktiven Schichten eine nur wenige Mikrometer dünne Materialschicht bilden und dass die Herstellung mittels großflächiger Dünnschichttechnik erfolgt, die aus der Display- und Architekturglasbeschichtung bekannt sind. Die Produktionseinheiten haben mindestens Quadratmetermaßstab, sind also um zwei Größenordnungen größer als ein Siliziumwafer! Dabei sind die Schichten so dünn, dass sie mechanisch nicht selbsttragend sind und deshalb auf eine Trägerplatte (= Substrat) aufgebracht werden müssen. Dafür wird in der Regel Fensterglas verwendet. Es kommen aber auch flexible Folien aus Kunststoffen oder Metall zum Einsatz, was langfristig eine kostengünstige Rolle-zu-Rolle-Beschichtung ermöglicht. Ganz wichtig ist, dass die Verschaltung der Einzelzellen zum Modul – meist mit Lasern – in den Herstellprozess integriert werden kann. Damit ist die Technologie kosteneffizienter zu automatisieren und variabler in der Pro-

duktgestaltung. Die wesentlichen Komponenten der verschiedenen Dünnschichtsolarzellen mit Angaben der Schichtdicken zeigt Bild 3.

Die Licht absorbierende Schicht wird als p-n-Schichtpaket ausgeführt. Im Falle von a-Si kommt eine p-i-n-Struktur zum Einsatz, die in einigen Fällen als Multispektralzelle (z. B. in Kombination mit µc-Si) ausgeführt wird. In der intrinsischen (i) bzw. der p-Schicht erfolgt die Wandlung von Lichtenergie in elektrische Energie. Zwei elektrische Kontaktschichten, von denen mindestens eine zusätzlich lichttransparent sein muss (ausgeführt als elektrisch leitfähiges transparentes Oxid, „transparent conductive oxide“ (TCO)), vervollständigen die Zelle. Wichtig ist eine sorgfältige, hermetische Verkapselung. Das eigentliche Substrat kann sowohl auf der lichtabgewandten Seite (Substrataufbau) oder auf der lichtzugewandten Seite (Superstrataufbau) sein. Im Unterschied zu Letzterem muss im Substrataufbau das Substrat nicht lichtdurchlässig sein. Die Verkapselung erfolgt auf der dem Licht zugewandten Seite, muss also transparent und UV-stabil sein.

Das Prinzip der monolithischen Verschaltung zeigt Bild 4. Die frontseitige Kontaktschicht verbindet die Zelle jeweils mit dem Rückkontakt der Nachbarzelle. Die Modulspannung ist proportional zur Anzahl der seriell verschalteten Zellen. Der Strom ist proportional zur Zellfläche und damit zur Zelllänge. Neben den meist niedrigeren Produktionskosten sind die wichtigsten Vorteile der Dünnschichttechnologien:

Anzeige

**megacom**  
 ist ein deutscher Hersteller für  
**Funkfinger**  
 kompatibel mit allen gängigen Schwesterrufanlagen ohne zusätzliche Installationskosten, zu einem hervorragenden Preis-Leistungs-Verhältnis.  
**Nähere Infos unter Telefon 04191 90850 oder www.megacom-gmbh.de**

**a) bezogen auf die Produktionstechnik**

- geringer Material- und Energieeinsatz (Energierückzahlzeiten 1–3 Jahre);
- großflächig automatisierte Herstellungsverfahren (Produktionsgröße  $\geq 1 \text{ m}^2$ , integrierte Verschaltung);
- hohe Produktionstiefe in der Fertigung, wenige Produktionsschritte;

**b) bezogen auf das Produkt**

- gute Erträge, homogenes Design;
- Möglichkeiten der Farb- und Lichtgestaltung (Semitransparenz);
- leichte Einbindung in die Gebäudehaut (Zusatzfunktionen: Abschattung, Abdichtung, Wärmeisolation, Ästhetik ...);
- geometrisch und optisch leicht anpassbare Produktintegration.

Technologie verfügbar sein (z. B. Centromtherm).

Beim Vergleich der drei Technologien a-Si/ $\mu$ -Si, CdTe und CIS (Tafel 1) lässt sich feststellen, dass a-Si/ $\mu$ -Si in der Produktionstechnik am weitesten fortgeschritten ist, CIS die höchsten Modulwirkungsgrade erreicht hat und CdTe (First Solar) die Kostenführerschaft in der PV übernommen hat.

Bei der Si-Dünnschichttechnik gibt es sehr unterschiedliche „Device-Konzepte“. Von der einfachen a-Si p-i-n-Diode, der Tandemzelle aus a-Si oder a-SiGe-Legierungen bis hin zu Tripelzellen reicht die Palette. Einige Hersteller verwenden auch kristallisiertes mikrokristallines Si. Eine vielversprechende Variante ist die Tandemzelle aus a-Si/ $\mu$ -Si. Modulen mit dieser Materialkombination werden in Kürze Wirkungsgrade von 10 % zugetraut. Allerdings ist hier die Produktionstechnologie noch in den Anfängen. Produkte sind für 2009 angekündigt (z. B. Inventux Technologies AG, Sunfilm AG, Signet Solar). Nur a-Si-basierte Module werden auch als mechanisch flexible Module in größeren Mengen angeboten.

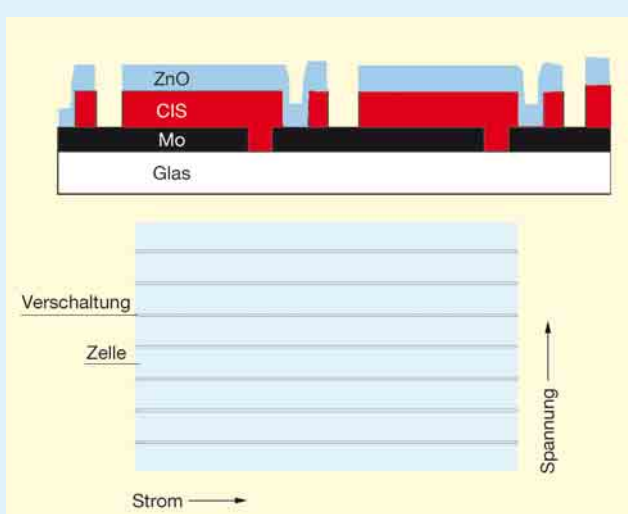
Beim a-Si/ $\mu$ Si wird der Halbleiter durchgehend mit der plasmaunterstützten Gasphasenabscheidung (PECVD) abgeschieden. Der Trend geht von 1,1 m  $\times$  1,4 m großen Substraten hin zu größeren Produktionseinheiten

**4 Stand der Technologien im Vergleich**

In der Vergangenheit haben die Produzenten spezifisches Fertigungs-Know-how selbst aufbauen müssen. Heute gibt es Ausrüsterfirmen, überwiegend aus dem Umfeld der Flachbildschirmtechnik, die vor allem für die a-Si/ $\mu$ -Si-Technik schlüsselfertige Fabriken verkaufen (z. B. Oerlikon, Applied Materials). Bald wird dieses Angebot auch für die CIS-

**4 Monolithische Verschaltung der Einzelzellen zum Modul am Beispiel von CIS**

**oben** im Schnitt: Die Kontaktschichten benachbarter Zellen überlappen sich  
**unten** in der Draufsicht



**Tafel 1 Vergleich der drei wichtigsten Dünnschicht-Technologien a-Si, CdTe, CIS. Hochrechnung der Kapazitäten der z. Zt. am Markt tätigen Industrie [4].**

Typ	Produktionstechnik	Modulqualität		Kapazität 2008	Umweltaspekte
		2008	2010		
a-Si/ $\mu$ -Si	<ul style="list-style-type: none"> <li>• industrielle Massenproduktion</li> <li>• Komplettlösungen am Markt</li> </ul>	6–7 %	10 %	ca. 1200 MW <sub>p</sub>	Einsatz von umweltschädlichen Gasen in der Produktion ist beherrschbar
CdTe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• industrielle Massenproduktion</li> <li>• CdTe sehr schnell herstellbar (Kostenführerschaft)</li> </ul>	7–10 %	12 %	ca. 600 MW <sub>p</sub>	Cd liegt im Modul als stabiles Cadmium-Tellurid vor. Umweltrisiken sind nicht gegeben. Te-Verfügbarkeit ist begrenzt.
CIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• industrielle Massenproduktion</li> <li>• vielfältige neue Konzepte</li> </ul>	9–12 %	14 %	ca. 400 MW <sub>p</sub>	In-Verfügbarkeit ist begrenzt

**MEGAMAN®**  
Die EnergieSparLampe

**Energieeffizienz:**

*Wir haben die LED-Alternativen mit 20.000h Lebensdauer und hoher Lichtstabilität!*



**LED** ✓  
AR11 (GU10) 15W  
24° - 3600cd - PF: > 0.7  
ersetzt 50W Halogen



**LED** ✓  
PAR30 (E27) 15W  
24° - 2800cd - PF: > 0.7  
ersetzt 75W Halogen



**LED** ✓  
PAR20 (E27) 8W  
30° - 1000cd - PF: > 0.7  
ersetzt 50W Halogen



**LED** ✓  
PAR16 (GU10 & E14) 7W  
35° - 600cd - PF: > 0.7  
ersetzt 35W Halogen

**MEGAMAN - IDV GmbH**

Birkenweiherstr. 2 • D-63505 Langenselbold  
Tel.: 06184/9319 - 0 • Fax: - 19  
info@megaman.de

[www.megaman.de](http://www.megaman.de)

(2,6 m x 2,2 m). Die Verfügbarkeit von „schlüsselfertigen“ Produktionsanlagen hat vor allem in Deutschland, aber auch in Asien einen Investitionsboom ausgelöst (z. B. Ersol, Schott Solar, Sontor, Masdar ...), weil den Investoren zeit- und kostenintensive Entwicklungsrisiken abgenommen werden.

Auch beim CIS gehen immer mehr Firmen in die Massenproduktion (Würth Solar, Johanna Solar, Showa Shell, Honda, Avancis, Solibro, Odersun). Die Variationsbreite der verwendeten Halbleiterstrukturen ist hier ähnlich hoch wie bei der Si-Technologie. Einige Hersteller verwenden eine Legierung aus reinem Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>. Andere mischen etwas Schwefel (S) bei oder ersetzen gar das Se komplett mit S. CIS kann direkt mittels Koverdampfung bei erhöhten Beschichtungstemperaturen hergestellt werden (ZSW/Würth Solar, Global Solar, Solibro). Oder man bringt die Materialien Cu, In, Se oder S kostengünstig als Vorläuferschichten mittels Kathodenzerstäubung auf (Avancis, Johanna Solar, Honda, Showa Shell). In neueren Entwicklungen werden potentiell kostengünstige Methoden wie Druck- und galvanische Verfahren eingesetzt. Anschließend werden die Schichten unter Se- bzw. S-Atmosphäre bei erhöhten Substrattemperaturen kristallisiert. Einzelne Schichten (z. B. Kontaktschichten auf Glas) können heute schon in so genannten „Jumbo-Coatern“ auf Gläsern im Format 3,2 m x 6 m abgeschieden werden. Hier kommen die klassischen Architekturglasbeschichtungsanlagen (z. B. v. Ardenne Anlagentechnik, Saint Gobain Glas) zum Einsatz.

Bei der CdTe-Technologie ist die Situation wesentlich übersichtlicher. Die Technologie wird derzeit von einem Hersteller dominiert, der sein Produktionsvolumen an den Standorten USA, Deutschland und Malaysia bis 2009 allein auf über 1 GW<sub>p</sub> ausbauen wird und damit die Kostenführerschaft in der Photovoltaik übernommen hat. Neu hinzugekommen, aber noch nicht am Markt präsent ist z. B. die Q-Cells-Tochter Calyxo.

## 5 Erfahrungen mit Dünnschichtgeneratoren

Inzwischen gibt es PV-Generatoren in Dünnschichttechnik von kW-Größe auf dem Einfamilienhaus bis hin zur MW-Freiflächenanlage.

Anzeige

**megacom**

ist ein deutscher Hersteller für  
**Schwesternrufanlagen**  
drahtlos und drahtgebunden, mit und ohne  
Sprache, zu einem hervorragenden  
Preis-Leistungs-Verhältnis.

**Nähere Infos unter Telefon 04191 90850  
oder [www.megacom-gmbh.de](http://www.megacom-gmbh.de)**

An ihrer Praxistauglichkeit besteht kein Zweifel. Bei a-Si- und CdTe-Anlagen gibt es gerade für große Freiflächenanlagen schon langjährige Betriebsdaten. In Deutschland wurden 2008 ca. 486 MW<sub>p</sub> in Freiflächenanlagen verbaut. Für den Zubau im Jahr 2008 beträgt der Anteil der Dünnschichtanlagen bereits 82%! Für CIS gab es den Praxisbeweis zunächst bei kleinen bis mittleren Anlagengrößen. Erste MW-Anlagen entstanden 2007 in Spanien. Für a-Si/μcSi-Anlagen gibt es noch relativ wenig Praxiserfahrung.

Die zu erwartende spezifische Energieernte von Dünnschicht-Solaranlagen ist – Langzeitstabilität vorausgesetzt – maßgeblich vom Temperaturverhalten und (unter mitteleuropäischen Klimabedingungen) von der Schwachlichtempfindlichkeit bestimmt. Innerhalb der einzelnen Zelltechnologien gibt es signifikante Unterschiede im elektrischen Verhalten. Tendenziell ist die Ausgangsleistung von CdTe- und a-Si-Modulen weniger temperaturabhängig als bei CIS und kristallinem Silizium. CdTe-Module der aktuellen Generation weisen einen überhöhten Wirkungsgrad bei Schwachlicht auf. Der Füllfaktor ist meist niedriger als bei kristallinen Modulen. Beim a-Si ist der Modulwirkungsgrad übers Jahr nicht konstant. Aufgrund des Temperatureinflusses ist die Effizienz im Sommer höher als im Winter. Dieser Effekt liegt in der Größenordnung von 10% und muss bei der Berechnung von Temperaturkoeffizienten aus Freifelddaten berücksichtigt werden.

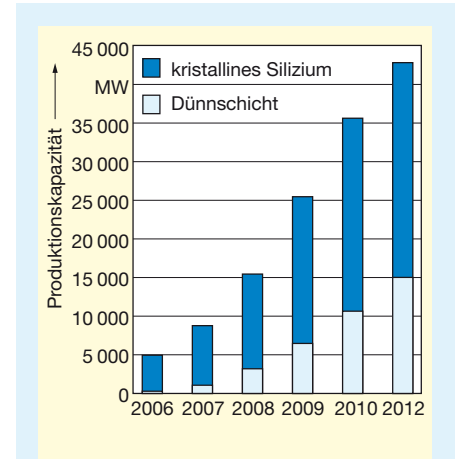
Eine Besonderheit der Dünnschichttechnik stellt die Verfügbarkeit von flexiblen Modulen dar. Diese werden im Rolle-zu-Rolle-Verfahren hergestellt und können als besonders leichte, aufrollbare Solarmodule z. B. bei Flachbauten die Dachhaut ersetzen.

Neben Freiflächenanlagen und normalen Dachanlagen eignen sich Dünnschichtanlagen bedingt durch ihre ansprechende Ästhetik auch sehr gut für die Gebäudeintegration.

## 6 Prognosen und Zukunftsaufgaben

Insgesamt betragen die Steigerungsraten im Dünnschichtbereich zur Zeit weit über 30%, die zu erwartende Gesamtkapazität Ende 2008 liegt über 2000 MW<sub>p</sub>. Da diese Zahlen auf z. T. sehr optimistischen Herstellerangaben beruhen, sind die Werte mit Vorsicht zu betrachten. Die tatsächlich produzierte Menge wird auf ca. 1 GW<sub>p</sub> in 2008 geschätzt.

Hält dieser Trend an, wird der Anteil der Dünnschichttechnik an der gesamten PV in wenigen Jahren auf über 30% ansteigen. Alle derzeit angekündigten Produktionskapazitäten zusammen genommen ergeben für das Jahr 2008 eine Kapazität von 15 GW<sub>p</sub> (Bild 5 [5]). Die Sarasin-Bank schätzt die Produktionsmenge für 2012 auf ca. 5,6 GW<sub>p</sub>. Alle drei Technologien haben bewiesen, dass die großindustrielle Produktion beherrschbar



5 Ankündigungen der PV-Produktionskapazitäten [5]

ist. Die Produkte können in Qualität und Stabilität auf dem Markt konkurrieren und haben das Potential, die Produktionskosten auf unter 1 Euro/W<sub>p</sub> zu senken.

Langfristig betrachtet, liegt in der Steigerung des Wirkungsgrades auf 15–18% noch deutliches Potential. Die wichtigsten Entwicklungsthemen werden sein:

- Optimierung der Lichteinkopplung durch Verbesserung der Kontaktschichten (TCO);
- Verständnis des Zusammenspiels von Präparationsparametern und Volumen- und Grenzflächeneigenschaften;
- Entwicklung von Mehrfachzellen;
- Neue Produktionsverfahren (Vermeidung von teurer Vakuumtechnik).

Die Produktionskosten liegen heute bis auf eine Ausnahme noch deutlich über 1 Euro/W<sub>p</sub>. In einer Studie der europäischen Union [6] wird das Kostenreduktionspotential bis 2020 wie folgt abgeschätzt: a-Si/μc-Si < 0,7 Euro/W<sub>p</sub>; CIS < 0,8 Euro/W<sub>p</sub>; CdTe < 0,5 Euro/W<sub>p</sub>.

Ob das „Zeitalter von < 0,5 Euro/W<sub>p</sub>“ erreicht wird, hängt stark davon ab, wie schnell der notwendige Skalierungseffekt greift. Die Verbesserung der Produktivität wird wesentlich von der Wirkungsgradsteigerung vorangetrieben. Ohne intensive, kontinuierliche Forschung und Entwicklung werden diese Ziele nicht erreichbar sein. Weitere wichtige Faktoren sind Einsparungen durch innovative Material- und Prozesskonzepte, die sowohl die Halbleiterprozesse als auch die Verkapselung und die Modultechnik betreffen.

### Literatur

- [1] Mints, P.: Navigant Consulting, Inc. PV Services Program, Thin Film PV Conference EPIA; München, 2008
- [2] Mints, P.: Navigant Consulting, Inc.
- [3] Solarenergie 2008, Studie der Sarasin Bank, 2008
- [4] Herstellerangaben
- [5] Jäger-Waldau, A.: PV-SEC Valencia 2008
- [6] Strategic Research Agenda der EU, PV Technology Platform, 2007