



**7. Österreichische Photovoltaik Fachtagung**  
Wien, 17. und 18. Juni 2009

**Status – PV Dünnschicht**

Hans-Dieter Mohring, Michael Powalla

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW)  
Baden-Württemberg

# Gliederung

- Definition von Dünnschicht-Technik
- Solarzellentechnologien
- Dünnschichttechnik und Anlagenerfahrung
- Visionen und Prognosen

## Definition: Dünnschichttechnik

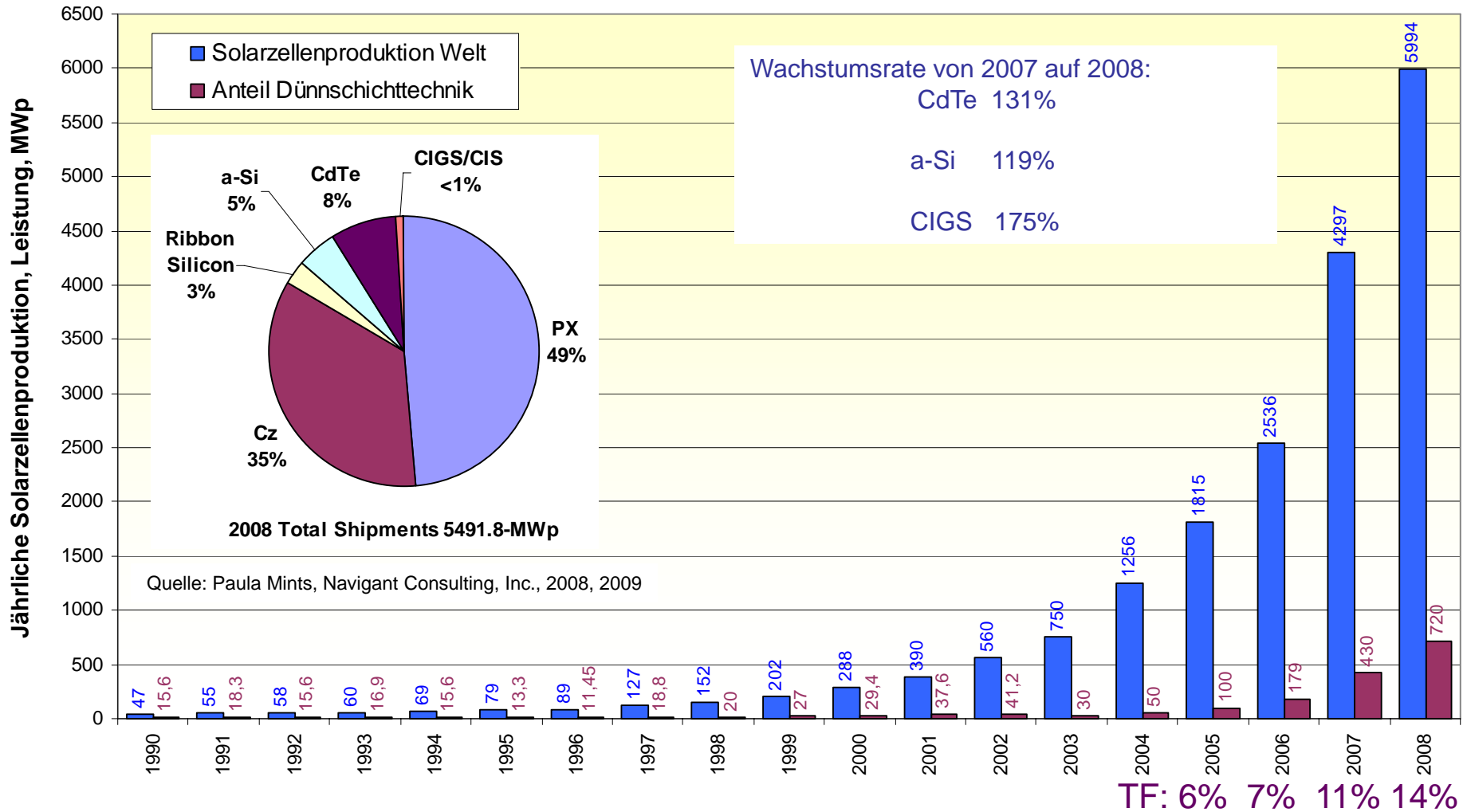
### **Kristalline Si-Module:** (mono-Si, multi-Si)

- Si-Scheiben (Wafer) mit Dicken zwischen 0,15 mm und 0,25 mm
- Scheibengröße 0,01 m<sup>2</sup> bis 0,04 m<sup>2</sup>
- Si-Scheibe (Wafer) - Zelle - Modul
- ~ 10 kg Halbleitermaterial je Kilowatt Leistung

### **Dünnschichttechnik:** (a-Si/ $\mu$ -Si, CdTe, CIS)

- Nicht selbst tragende Schichten, ~  $\mu$ m Dicke
- Produktionseinheiten: m<sup>2</sup>
- Hohe Fertigungstiefe, monolith. Verschaltung
- ~ 0,2 kg Halbleitermaterial je Kilowatt Leistung

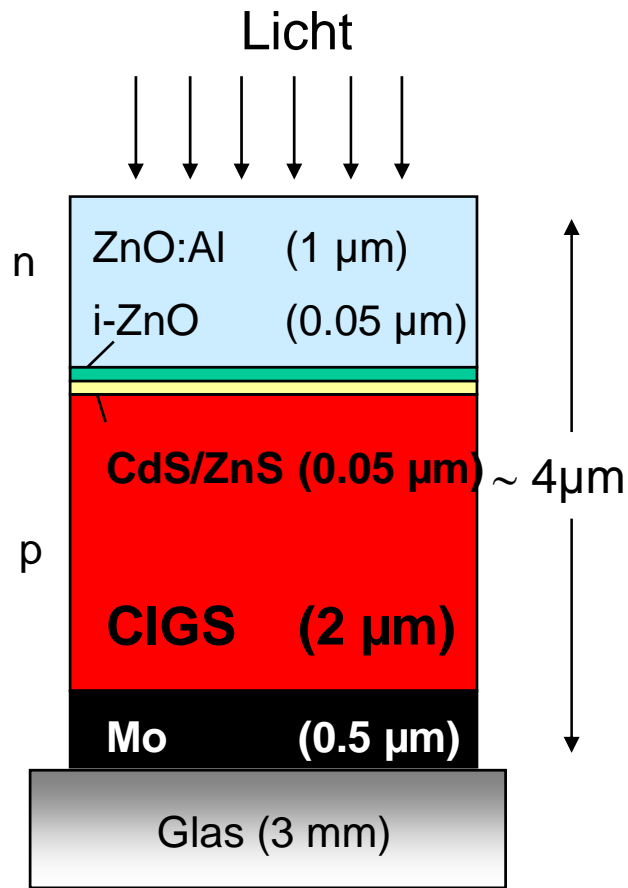
# Solarzellenproduktion Welt mit Anteil Dünnschichttechnik



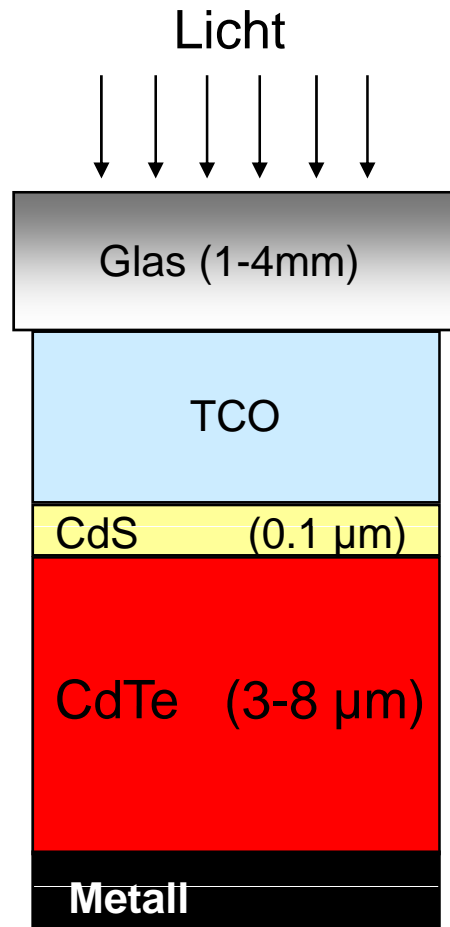
Quellen Solarzellenproduktion Welt:  
 Daten 1983 bis 2000: Räuber, PSE  
 Daten 2001 bis 2002: Strategies Unlimited / P. Maycock (PV Systems Inc.)  
 Daten 2003 bis 2007: Photon 3/2008  
 Daten 2008: EuPD Research, 2009

Quellen Dünnschichtanteil:  
 Daten 1990 bis 2002: DLR, 2005  
 Daten 2003 bis 2005: EPIA  
 Daten 2006 bis 2007: Navigant Consultant Inc.  
 Daten 2008: EuPD Research, 2009

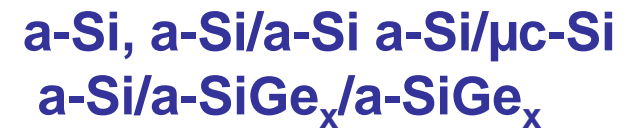
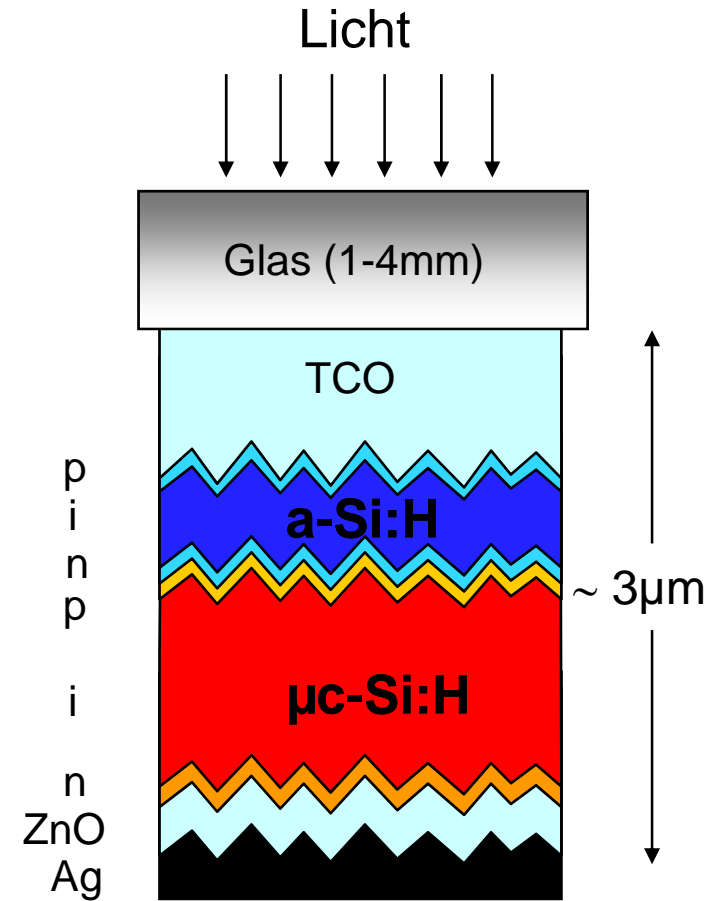
### CIGS-Solarzellen:



### CdTe-Solarzellen:



### a-Si/μc-Si Tandemzelle:

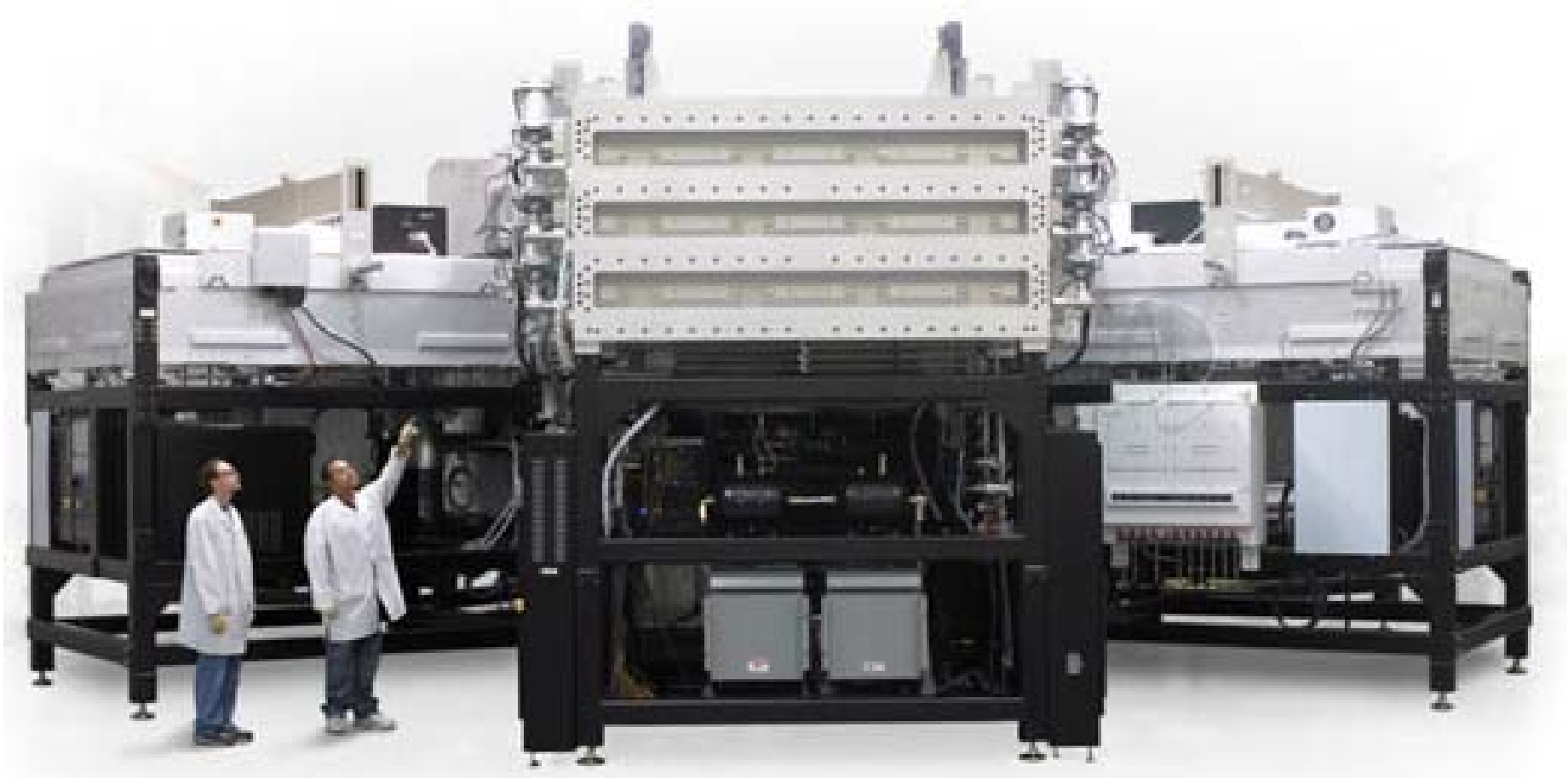


# Warum Solarzellen in Dünnschichttechnik?

## Wichtigste Vorteile

- Langfristig kostengünstiger
- flexibel
- schöner (?)
- Energierücklaufzeit
- Spin-off der Großflächenbeschichtung (Architekturglas, Flachdisplays)

# Einsatz von Anlagentechnik aus der Beschichtung von Flachdisplays

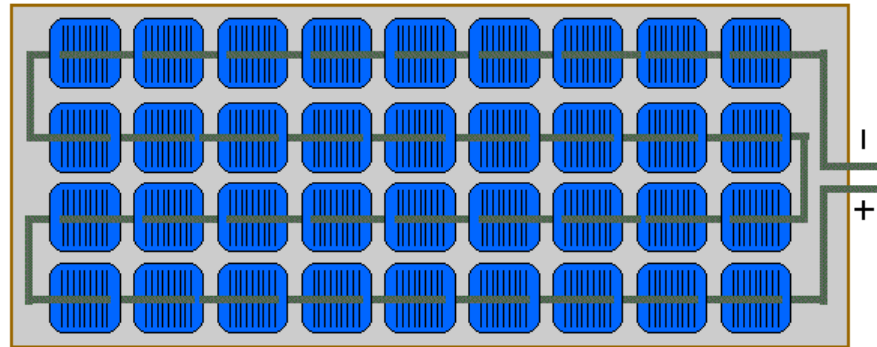


Quelle: AMAT

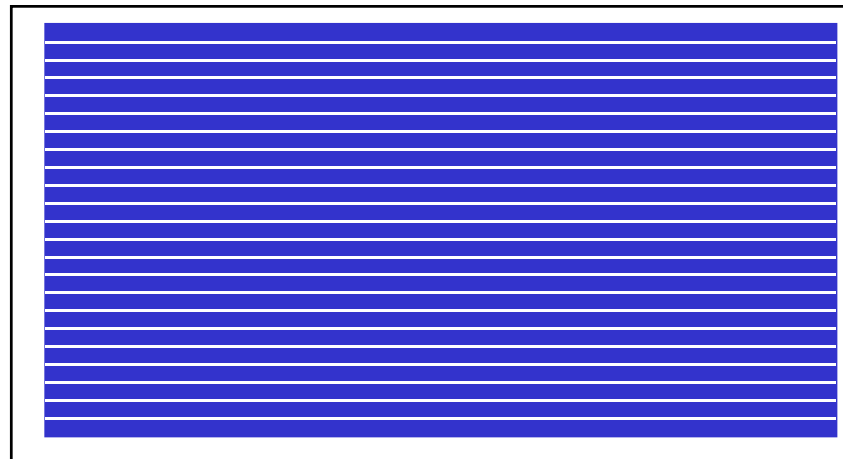
Die Modulspannung ist proportional zur Anzahl der seriell verschalteten Zellen.

Der Strom ist proportional zur Zellfläche.

Einzelzellen



Monolithische Verschaltung

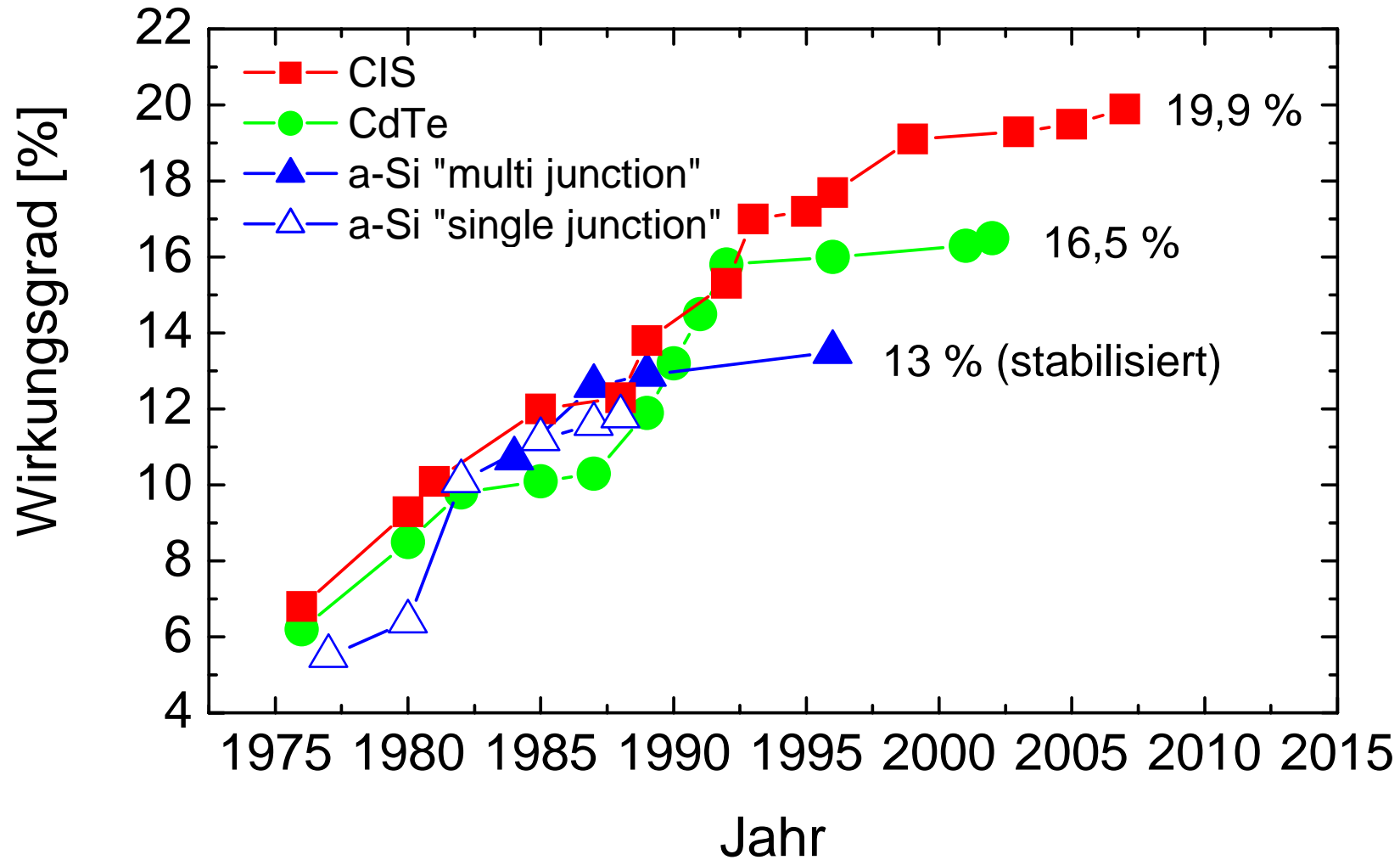


↑  
Spannung

Strom →



# Zellwirkungsgradrekorde aus dem Forschungslabor



## Dünnschichtsilizium: a-Si

- ausgezeichnete Materialverfügbarkeit (Si: zweithäufigstes Element)
- kann bei hoher u. niedriger Temperatur abgeschieden werden  
→ große Substratauswahl
- nicht-kristalline (amorphe) Struktur vereinfacht Stapelstrukturen
- leichte Dotierbarkeit in der Gasphase (ohne Tempersschritt)
- Verringerung (Variation) des Bandabstands durch Legierung

## a-Si: Herausforderungen und Lösungsansätze

- Lichtinduzierte Degradation von a-Si:H (Staebler-Wronski-Effekt)
  - Verringerung der intrinsischen Schichtdicke in p-i-n-Strukturen
  - Tandemzellen mit  $\mu\text{c-Si:H}$  (Erhöhung des kristallinen Anteils)
- Wirkungsgradbegrenzung (Photostrom!) durch hohen Bandabstand
  - Tandem- bzw. Tripel-Strukturen mit a-SiGe:H /  $\mu\text{c-Si:H}$
  - Texturierung, Lichteinfang etc.
- i-Schichtdicke:
  - a-Si:H 0,1  $\mu\text{m}$ , a-SiGe:H 0,15  $\mu\text{m}$ ,  $\mu\text{c-Si}$  3,0  $\mu\text{m}$
  - hohe Depositionsrate und Homogenität erforderlich
- Abscheidung von polykristallinem Si auf Fremdsubstrat (hohe Substrattemperatur temporär notwendig (~ 900 °C))

## Trends und Ziele (kurzfristig):

- Flächenvergrößerung auf Glas → 5,7 m<sup>2</sup>
- R2R auf Metall- und Polyimidfolie → Fassade und Dachintegration
- Entwicklung von PECVD-Anlagen zur Hochrate-Abscheidung von  $\mu\text{c-Si}$
- Übergang von amorph zu mikromorph (a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ )  
→ stabile, hohe Modulwirkungsgrade (Produktion)
- Ziel bis 2013:  $\eta_{\text{Modul}} > 10 \%$

Quelle: Photovoltaic Technology Platform

## $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{S,Se})_2$ - CIGSe, CIGS oder CIS

- höchstes Wirkungsgradpotenzial aller DS-Techniken (19,9 % Labor)  
→ Modulwirkungsgrade (Produktion) > 11 %
- stabil, d. h. keine lichtinduzierte Degradation
- unterschiedliche Produktionsmethoden möglich (z. B. Ko-Verdampfung, Sputtern, Elektrodeposition, Tinte, ...)  
→ Kostenreduktionspotenzial durch vakuumfreie Depositionsverfahren

### Herausforderungen und Lösungsansätze

- Materialkosten  
→ Verringerung der Schichtdicke, Steigerung der Ausbeute, ...
- relativ hohe Prozesstemperaturen (500 – 600 °C)
- Verfügbarkeit kommerzieller Beschichtungsanlagen verbesserungsfähig
- bessere Prozesskontrolle

## **Trends und Ziele (kurzfristig):**

- Suche nach preiswerten, vakuumfreien Produktionsverfahren
  - Tinte (Nano-CIS), siehe Fa. Nanosolar
  - galvanische Verfahren, siehe Fa. Odersun, CIS-Solartechnik
- Übergang zu R2R-Verfahren (billig, effizient, flexibel)
- Kostensenkung, Steigerung des Wirkungsgrads und der Ausbeute

## **Herausforderung CIS-flexibel:**

- Wirkungsgrad derzeit noch geringer als auf Glas
- (monolithische) Verschaltung erschwert
- flexible, langzeitstabile und kostengünstige Verkapselung!!

# CdTe

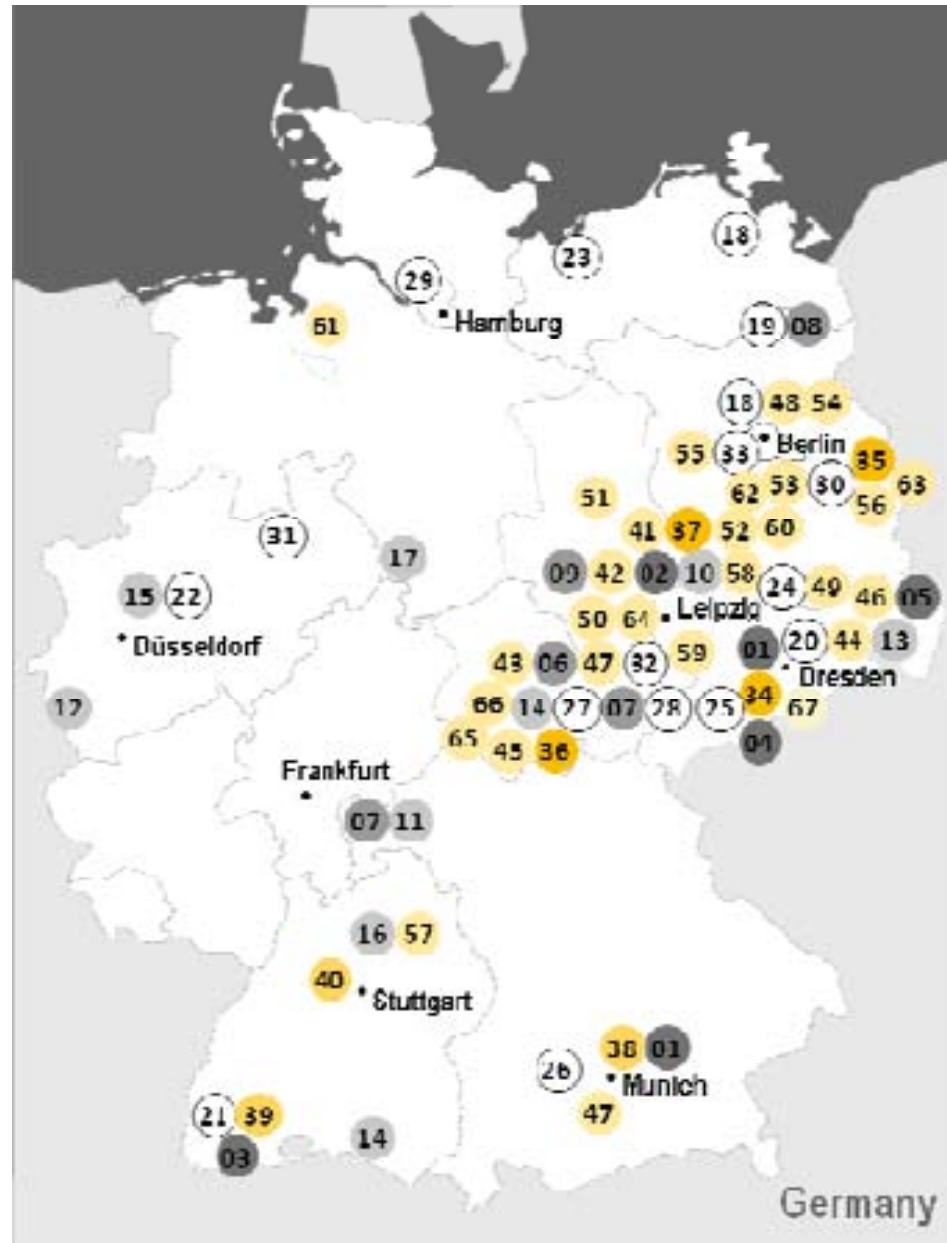
- Rel. einfache Produktionstechnik
  - CdTe hat die niedrigsten Produktionskosten: First Solar: 0,8 €/Wp
- z. Zt. dominiert von einem Hersteller
  - Verfügbarkeit kommerzieller Beschichtungsanlagen  
verbesserungsfähig
- Umweltaspekte beherrschbar

## Herausforderungen und Trends

- Effizienter Rückkontakt
- Reduktion der CdTe-Dicke
- Kontrollierte Interdiffusion an den Grenzflächen (Aktivierung)
- Reduktion der optischen Verluste an den Fensterschichten

# Dünnschichtphotovoltaik-Produktion

Konzentration in den neuen Bundesländern



Source: Invest in Germany



# Besonderheiten der Dünnschichtmodule in der Anwendung

## Generatorerträge

- Im Prinzip vergleichbar mit c-Si
- CdTe und a-Si weniger temperaturabhängig als CIS und c-Si
- Anfangsdegradation bei a-Si → Stabilisierung
- a-Si Sommer/Winter-Effekt, bei hohen T heilen Defekte aus
- CdTe/CIS Vorbeleuchtungseffekte
- z. T. gute Schwachlichterträge
- Ertragserfahrungen zeigen Stabilität über ca. 10 Jahre ( $< -0,5 \text{ %/a}$ )
- Auswertung ca. 100 Anlagen ergibt PR ca. 80 %

## Freiflächenanlagen

CIS: Solarpark in Spanien: Province Albacete  
3,26 MWp (41.600 Module Würth Solar)



CdTe: First Solar 1 MWp  
Quelle: Fraunhofer Magazin 2.2008



a-Si: Solarpark Buttenwiesen, 2004.  
(1 MWp Mitsubishi Heavy Industries)  
Quelle: Phönix SonnenStrom AG

## CIS Photovoltaik Module (Würth Solar) ersetzen Dachziegel



Detailansicht einer PV Fassade  
(CIS Module: Sulfurcell)

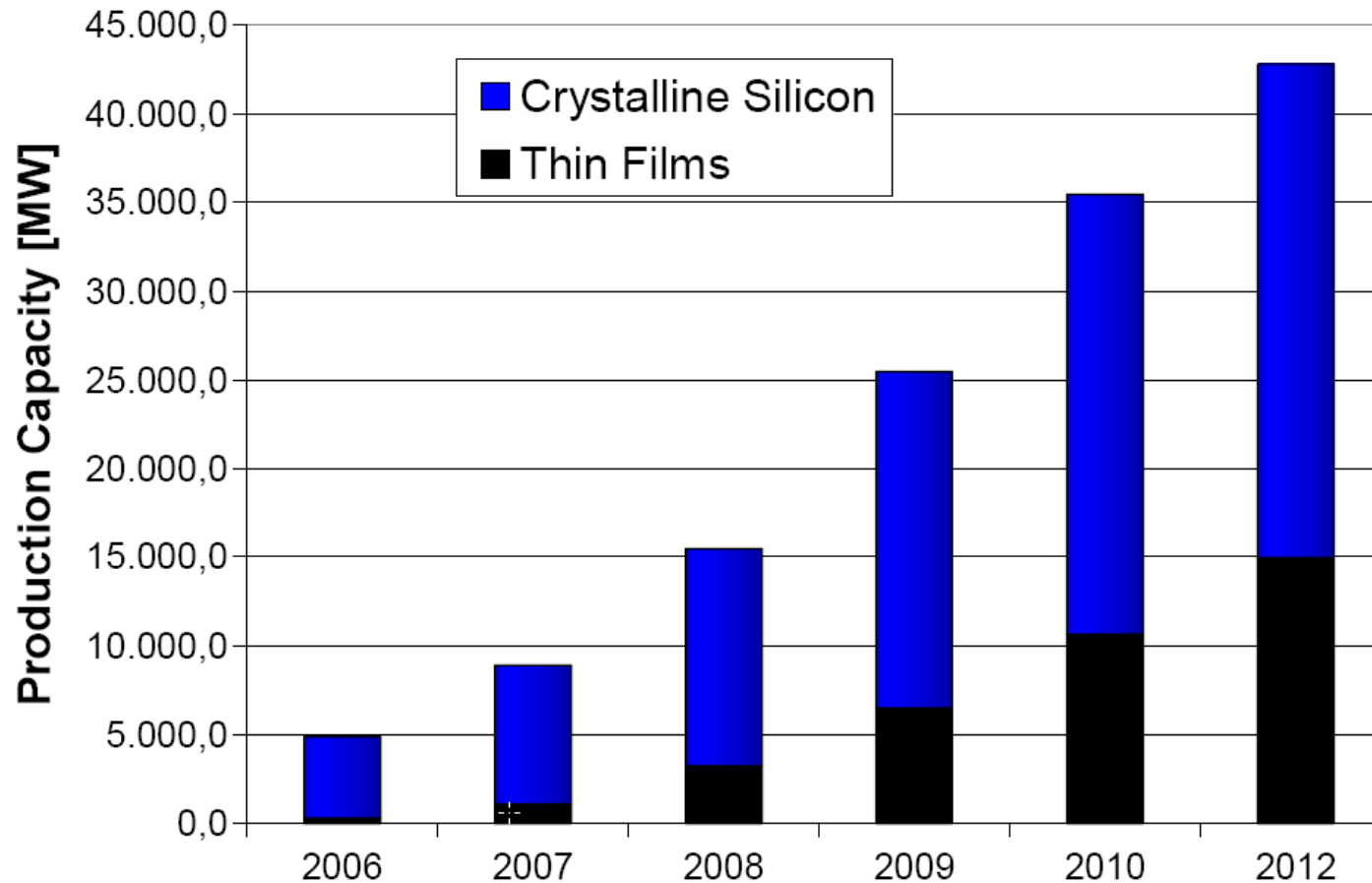


## Dünnschichtmodule können auch flexibel sein (a-Si Module: United Solar Ovonic)



Photo: Solar Integrated Technologies

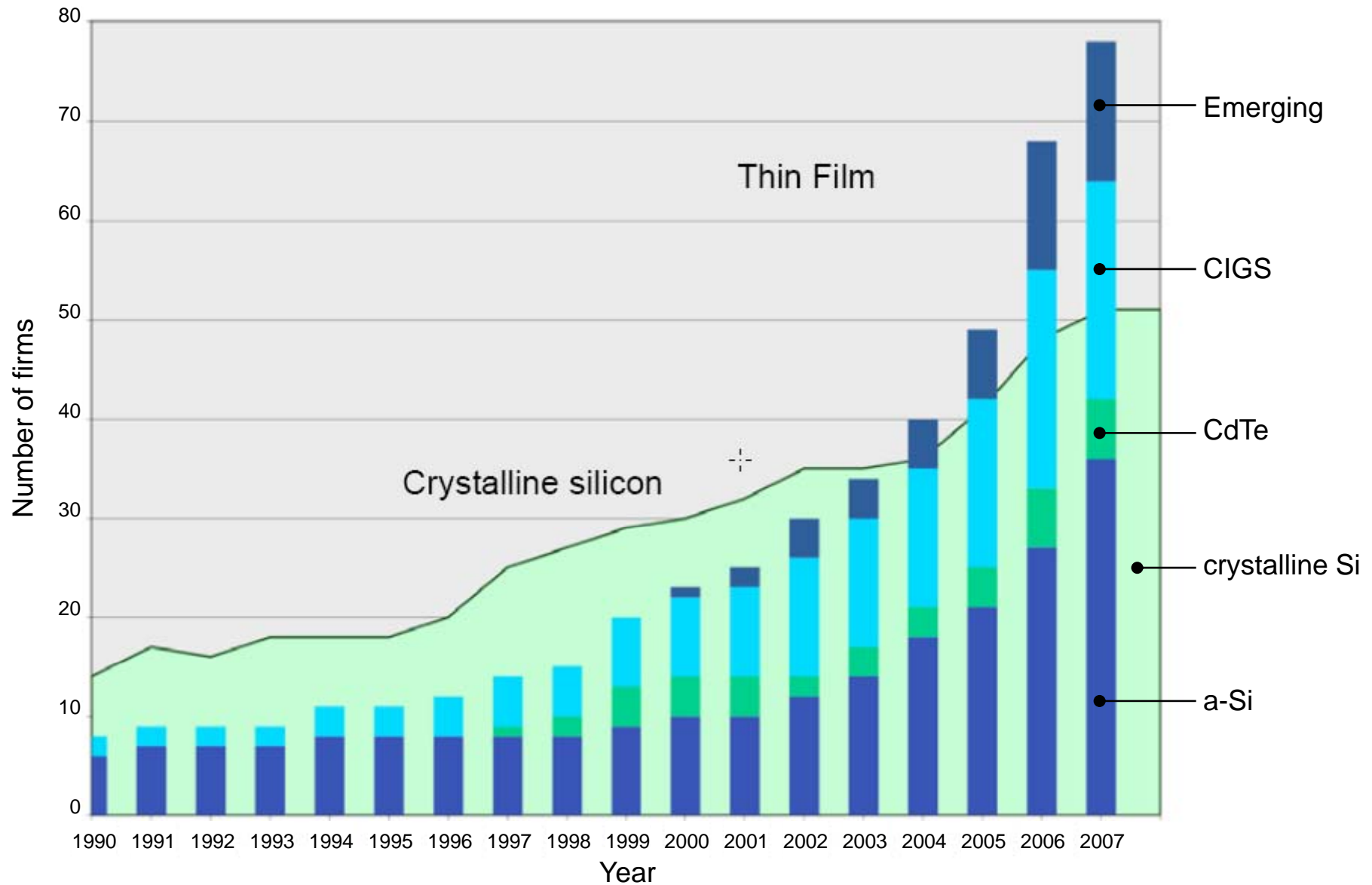
## Produktionskapazität Ankündigungen



Erwarteter Anteil der Dünnschichtphotovoltaik 2012:  $\geq 30\%$

Quelle: A. Jäger-Waldau, PVSEC Valencia 2008

# Anzahl der PV-Firmen aktiv in verschiedenen Technologiebereichen



Quelle: Greentechmedia 2007



# Kostenreduktion durch Volumeneffekte und Innovationen



- Produktionsvolumen und Lernkurven in der Produktion

- von Prototypen zur Standardisierung

- Wirkungsgrad

- Materialkosten

- intensive F&E und schneller Transfer in die Produktion

- innovative Materialien und Prozesse

- verbessertes Verständnis der Verlustprozesse und neue Bauelemente



F&E intensiver Innovationsschritt

# Zusammenfassung

- 2007 - 2009:  
Enorme Investitionen, Eintritt in die Massenproduktion,  
Produkterfahrungen bei allen Applikationsarten ( $\mu$ W-MW, BIPV)
- 2009 - 2010:  
Professionalisieren der z. T. noch prototypischen Produktion  
→ „copy exactly“, Automatisationsgrad, Homogenisierung der  
Produktion
- > 2010  
Neue Prozesse und Maschinen für das „ $\ll$  1 €/W – Zeitalter“  
Dünnschichtanteil steigt (2012 ca. 30 %)