



# Photovoltaik – Technologie und Anwendung

Franz H. Karg  
AVANCIS GmbH

Ludwig Maximilian Universität München  
22. Januar 2007

# Ausschnitte aktueller Energiedebatten...



- Russische Ölversorgung unterbrochen
- Wärmster November seit Beginn der Wetteraufzeichnung
- Feinstaubbelastung erfordert Fahrbeschränkungen

# Leitplanken nachhaltiger Energiepolitik (WBGU 2003)

## ■ Ökologie

- Klimaschutz
- Nachhaltige Flächennutzung
- Schutz von Flüssen, Meeren und der Atmosphäre

## ■ Sozio-Ökonomie

- Ausreichend und einkommensgerechte Energie für alle
- Begrenzte Risiken
- Keine Gesundheitsbelastung



# Exemplarischer Pfad zur Energiewende (WBGU 2003)

- Kurzfristig: Energieeffizienz
- Mittelfristig:
  - Begrenzter Einsatz fossiler Energiequellen (mit CO<sub>2</sub> Sequestrierung)
  - breites Spektrum regenerativer Energien
- Langfristig:  
Direkte Nutzung der Solarstrahlung

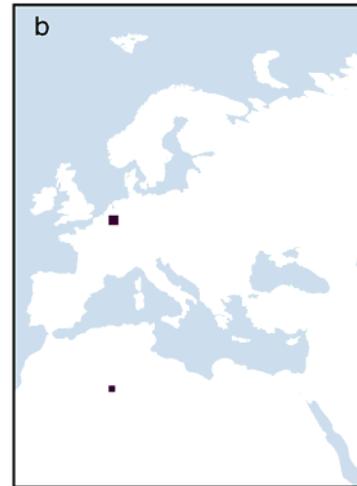
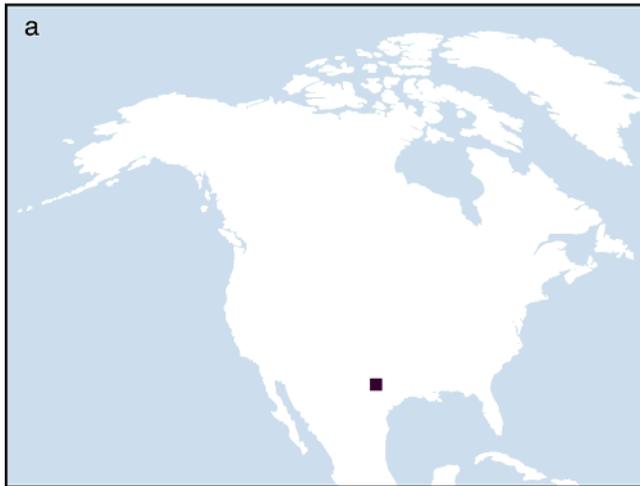


# Solar energy is not there, but it 's coming

**George W. Bush, Okt. 2005, nach Katrina:**

„I had an interesting opportunity to go see some research and development being done on solar energy. I'm convinced, someday in the relative near future we'll be able to have units on our houses that will be able to power electronics within our houses, and hopefully, with excess energy, be able to feed them back in the system. That's possible. We're not there yet, but it's coming. “

# Flächenbedarf PV zur kompletten solaren Deckung Nordamerikas bzw. Westeuropas



Quelle: WBGU Flächenbedarf zur solaren Stromerzeugung von USA bzw. Westeuropa

Westeuropäischer Strombedarf wird zu 2/3 aus Einstrahlungsverhältnissen wie Belgien gewonnen und zu 1/3 wie in der Sahara

Erforderliche PV Nennleistung für 100 % Strombedarf BRD:  $883,3 \text{ TWh} / 800 \text{ h} = 604 \text{ GW}$

Flächenbedarf:  $604 \text{ GW} \times 20 \text{ m}^2/\text{kW} = 12\,080 \text{ km}^2 = (110 \text{ km})^2 = 3.4\%$  der BRD Gesamtfläche

Vergleichswerte: Verkehrsfläche 4.8 %

Siedlungsfläche 7.8%

Zunahme der verbauten Fläche:  $1 \text{ km}^2 / \text{d}$

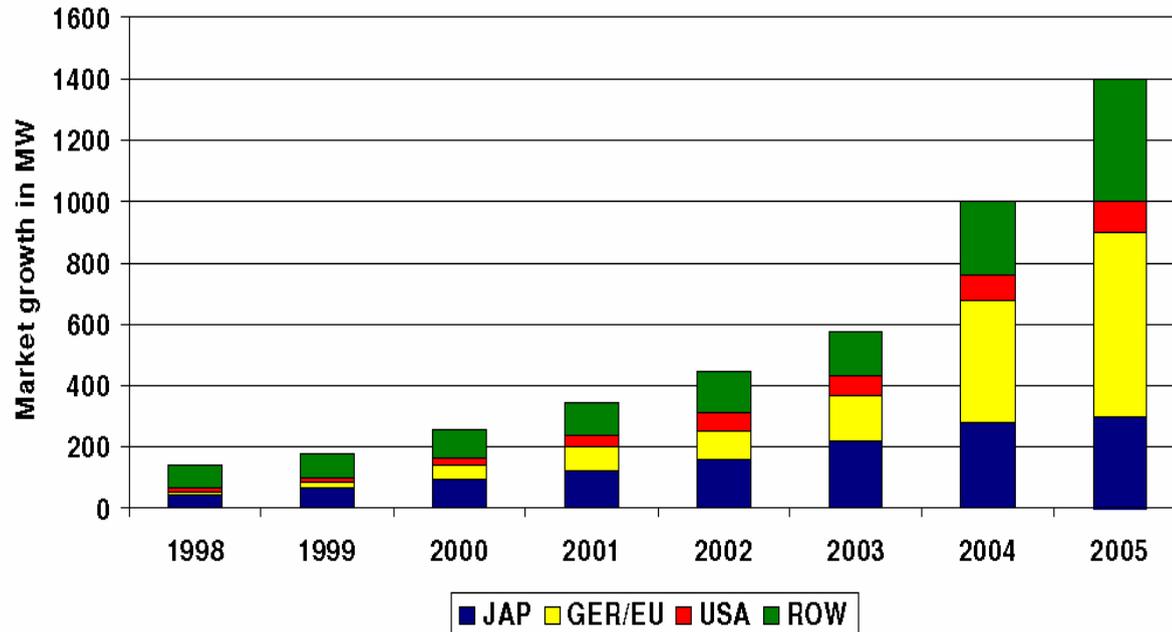
# Aufbau der Solarindustrie hat begonnen



Nr.	Unternehmen	Ort	Kapazität 2006/7 in MWp	Beschäftigt
<b>Silberien</b>				
S 1	Wecker AG	Freiburg/Burghausen	-	800
S 2	Johi Solar Silicon GmbH & Co. KG	Rheinländen	-	k.k.
<b>Wafer</b>				
W 1	Deutsche Solar AG	Freiburg	240	300 <sup>1)</sup>
W 2	PV Crystalax Solar AG	Erfurt	k.k.	180
W 3	Energ GmbH	Thalheim	30	150
W 4	AG Solarflex GmbH	Alzenau	45	-
W 5	Schott Solar GmbH	Alzenau	17	k.k.
<b>Zellen</b>				
Z 1	QCells AG	Thalheim	420	500
Z 2	BSI Solar Energy AG	Erfurt	220	280 <sup>2)</sup>
Z 3	Deutsche Cell GmbH	Freiburg	180	-
Z 4	Sumway AG	Amstutz/Monstanz	30/16	80/
Z 5	Schott Solar GmbH	Alzenau	65	k.k.
Z 6	SolarWorld Industrie Solstice GmbH	Gelsenkirchen	k.k.	k.k.
<b>Module</b>				
M 1	Solarwatt AG	Dresden	100	320
M 2	Solar Factory GmbH	Freiburg	100	-
M 3	Solar AG	Berlin/Greifswald	30	300
M 4	also solar AG	Pratzau	30	250
M 5	Hedikat Solar GmbH	Chemnitz	20	40
M 6	GSS Solar GmbH	Gera	15	20
M 7	Solar Wemar GmbH	Wemar	10	30
M 8	JSS Solar GmbH	Erfurt	10	20
M 9	Conergy AG	Frankfurt (Oder)	im Bau	k.k.
M 10	Solarflex AG	Freiburg	50	58
M 11	Sureit Energietechnik	Alzenau	k.k.	k.k.
M 12	Schott Solar GmbH	Alzenau	100	k.k.
M 13	Schott Solar Technologie GmbH	Gelsenkirchen	150	k.k.
M 14	Schott International KG	Nachen	k.k.	k.k.
M 15	solarone Produktions- und Vertriebsgesellschaft GmbH	Wedel	k.k.	k.k.
<b>Dünnschicht</b>				
D 1	CSG Solar AG	Thalheim	25	150
D 2	Amtec Solar GmbH	Amstutz	20	50
D 3	Sulforsk GmbH	Berlin	10	50
D 4	Solarion GmbH	Leipzig	Pilot	20
D 5	Odorun AG	Frankfurt (Oder)	im Bau	-
D 6	Wirth Solar GmbH & Co. KG	Schwäbisch Hall	14,8	30
D 7	Schott Solar GmbH	Putzbunn	k.k.	k.k.
<b>Dünnschicht im Bau/ in Planung</b>				
P 1	Schott Solar GmbH	Jena	im Bau	-
P 2	Finix Solar GmbH	Frankfurt (Oder)	im Bau	-
P 3	BSI Thin Film GmbH	Erfurt	im Bau	-
P 4	Johanna Solar GmbH	Brandenburg	im Bau	-
P 5	Calyxo GmbH	Thalheim	im Bau	-
P 6	Brilliant 234 GmbH	Thalheim	im Bau	-

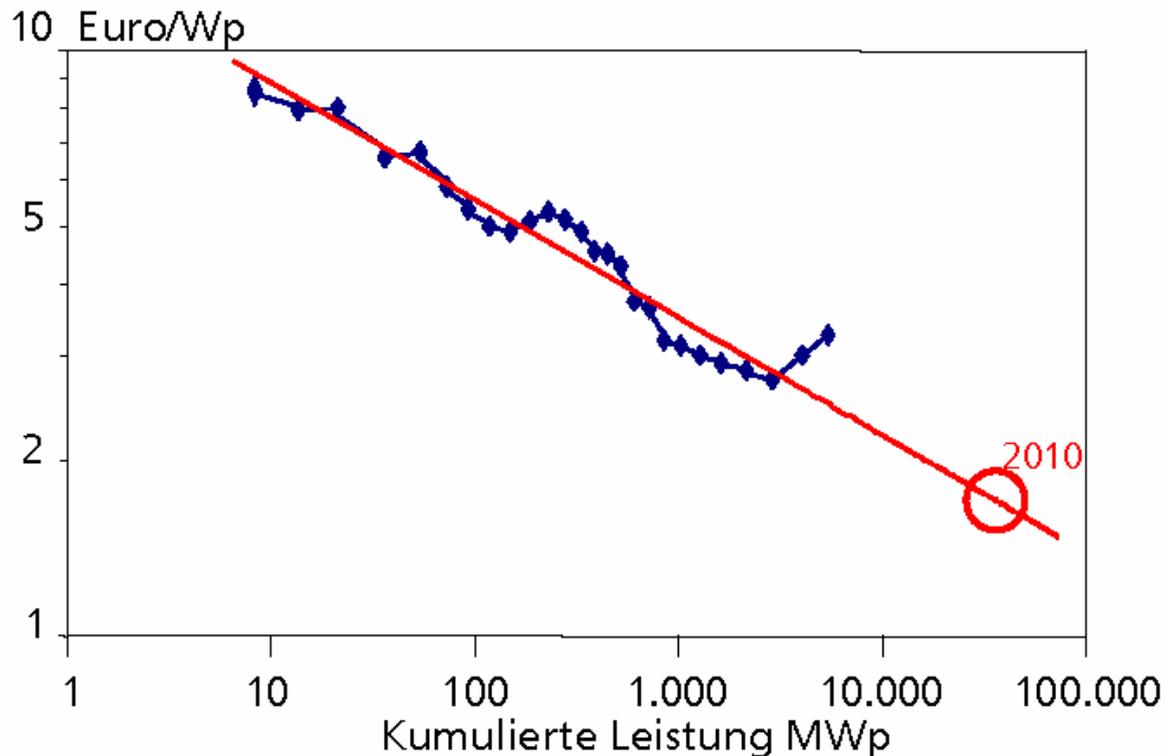
<sup>1)</sup> Gesamtbeschäftigte + der Solarworld AG  
<sup>2)</sup> Gesamtbeschäftigte + der Solar Energy AG

# Die PV Produktion wächst kontinuierlich: 30-40% /a Wachstum Konzentration auf J, D und China

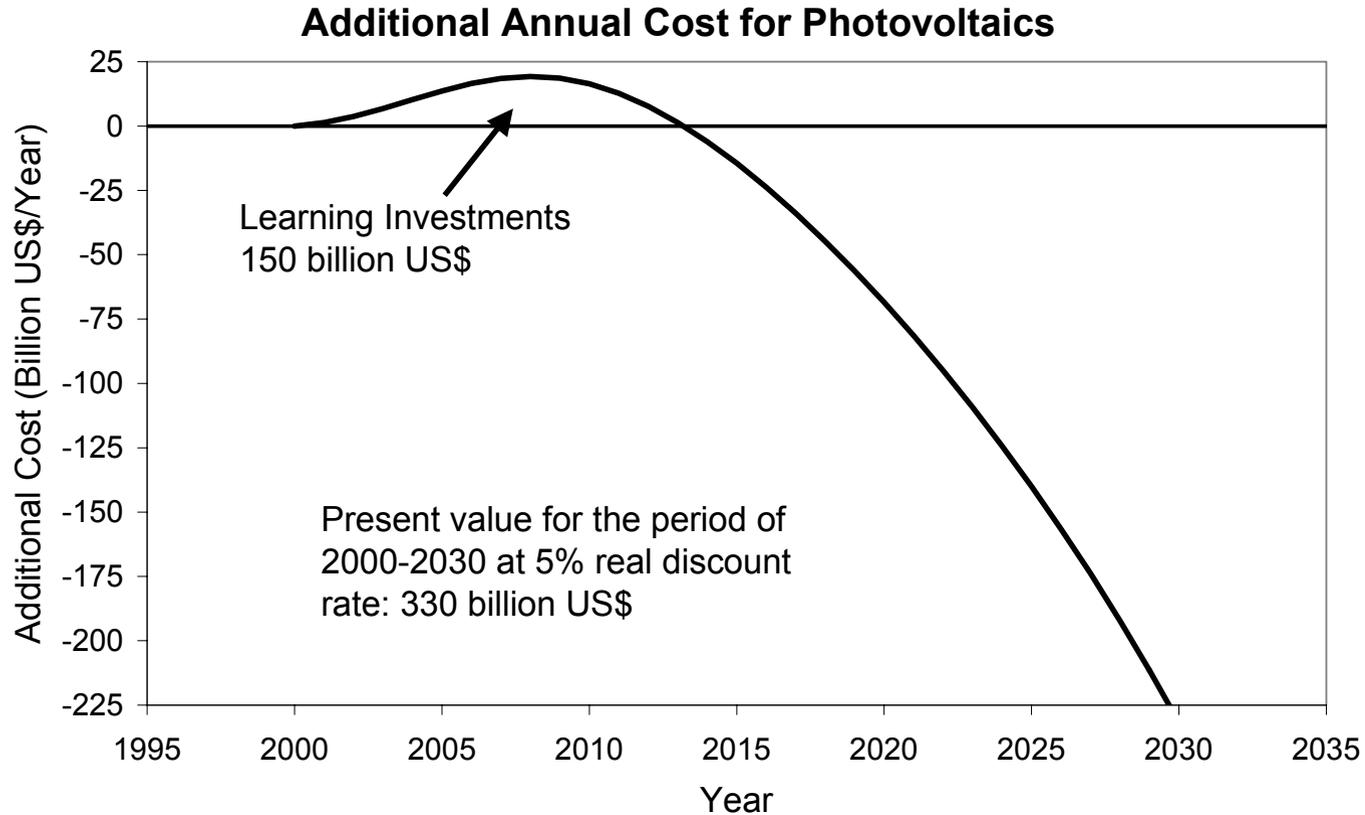


Source: EPIA

# Preis-Erfahrungskurve der PV Module: Langzeittrend: -23 % pro Verdopplung der akk. MW

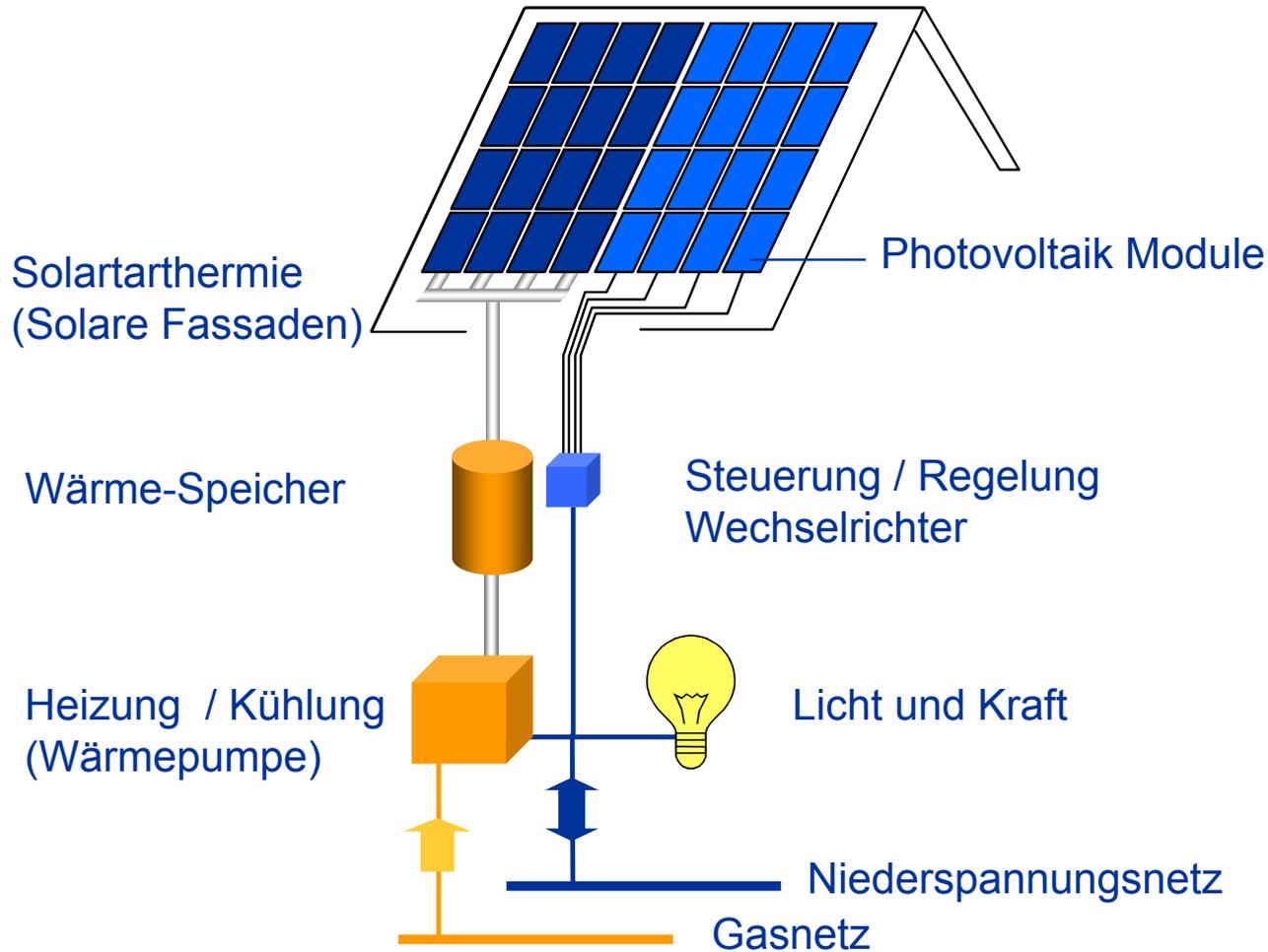


# “Lohnt” sich die Subvention in die Photovoltaik?



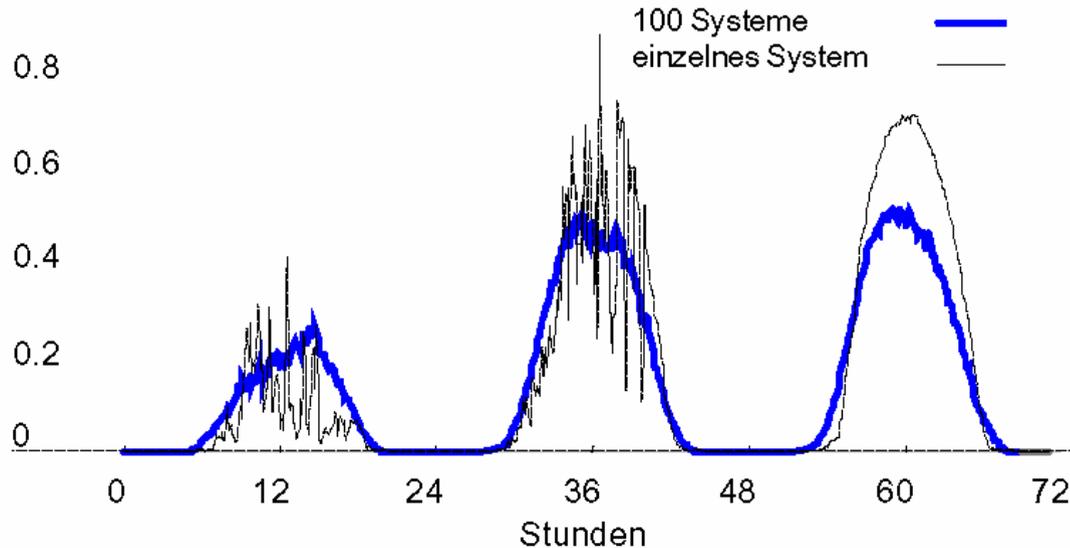
Source: Experience Curves for Energy Technology Policy

# Einbindung der PV in lokales und regionales Energienetz



# Regionale Mittelung der PV Leistung

1 Leistung/installierte Leistung; Juni 1995



Quelle: WBGU 2003

## Saisonale Mittelung mit Windenergie / KWK Anlagen



# Übersicht

- Kommerzielle Photovoltaik-Technologien:
  - 1. Generation: kristallines Silizium
  - 2. Generation: Dünnschichttechnologie
- Anwendungen
- 3. Generation und Ausblick:  
Tandemzellen und Konzentratoren



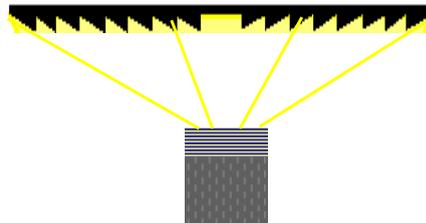
# PV Grundkonzepte



Mono / Multikristallines  
Silizium

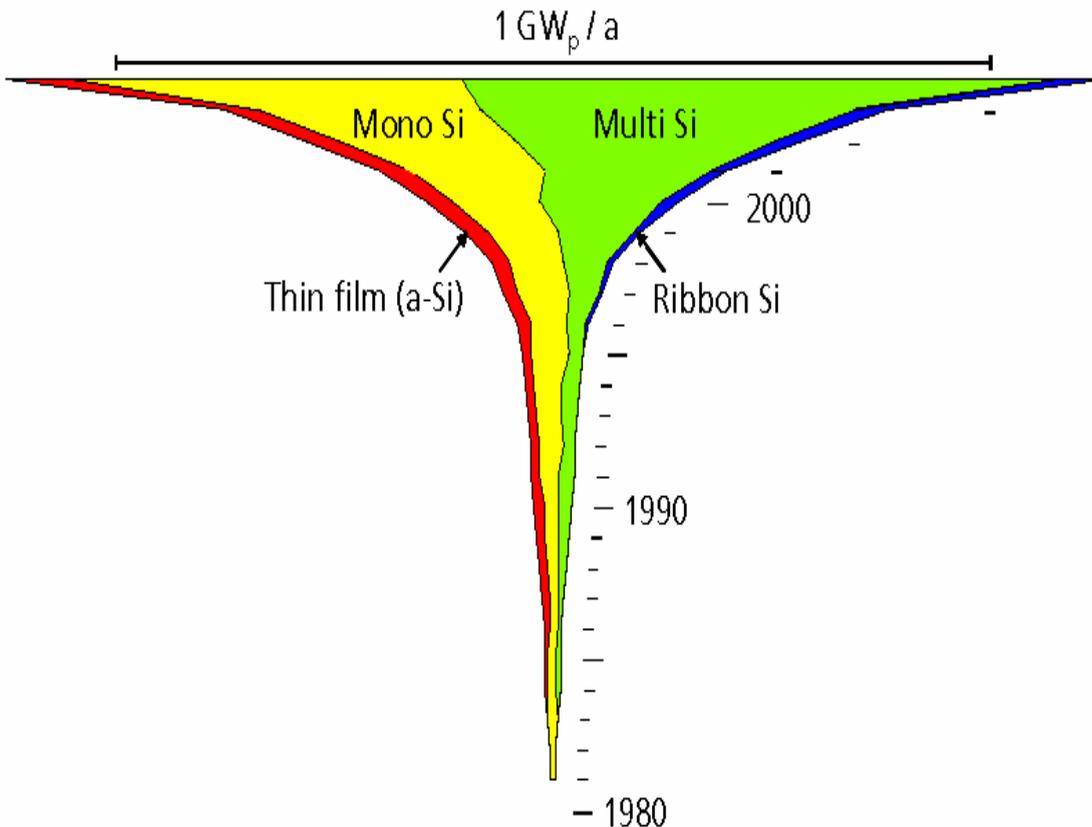


Dünnschichttechnologie



Tandems und  
Konzentratoren

# Aktuelles PV Marktwachstum wird getragen durch kristallines Silizium



Quelle: FhG-ISE

# Die Wertschöpfungsstufen bei der Si Photovoltaik



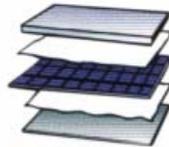
Reinstsilizium



Verschaltung



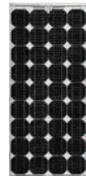
(Ein)-Kristallstab



Verkapselung



Wafer



Modul

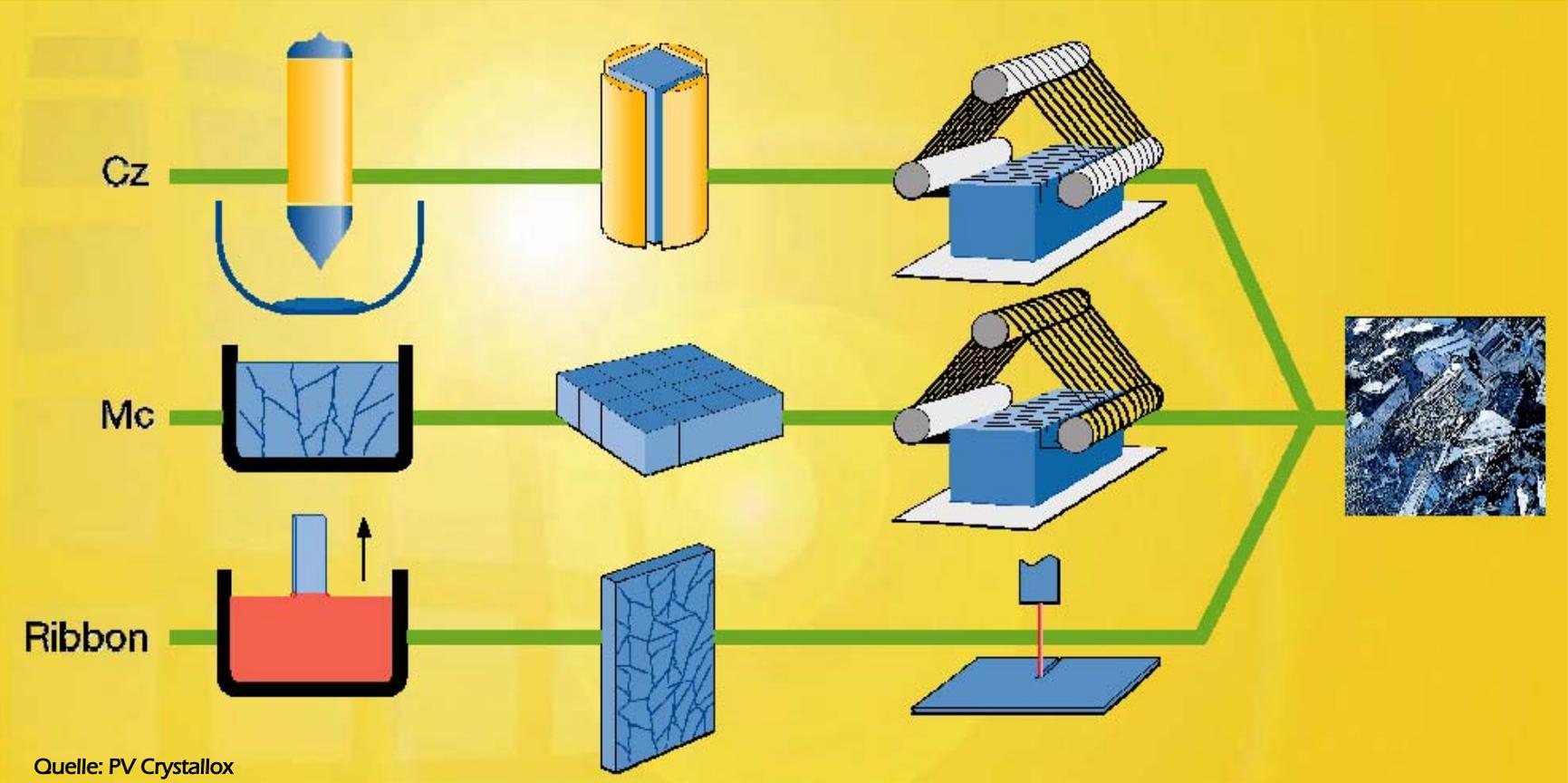


Solarzelle

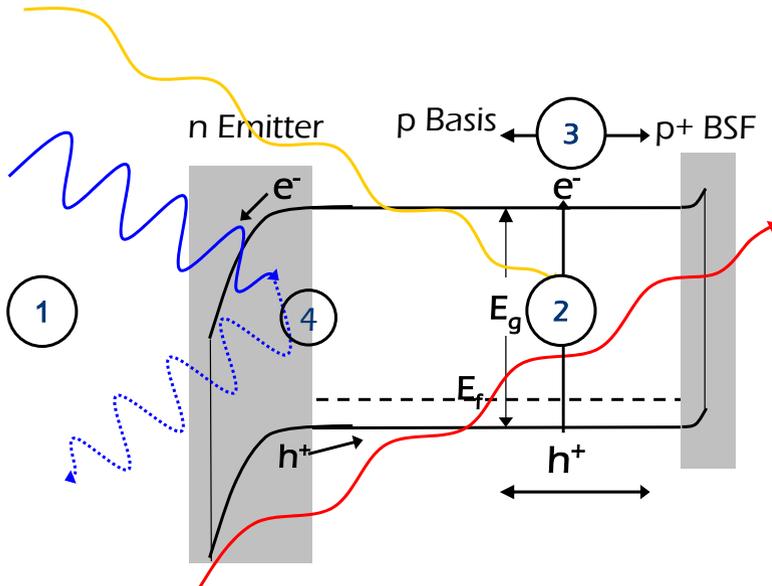
Analogien zur Elektronik, aber...

- wesentlich höherer Durchsatz ( $t_{Si} / d$ )
- weniger Prozessschritte
- höherer Materialkostenanteil
- längere Betriebsdauer

# Herstellungsprozesse für Si-Wafer

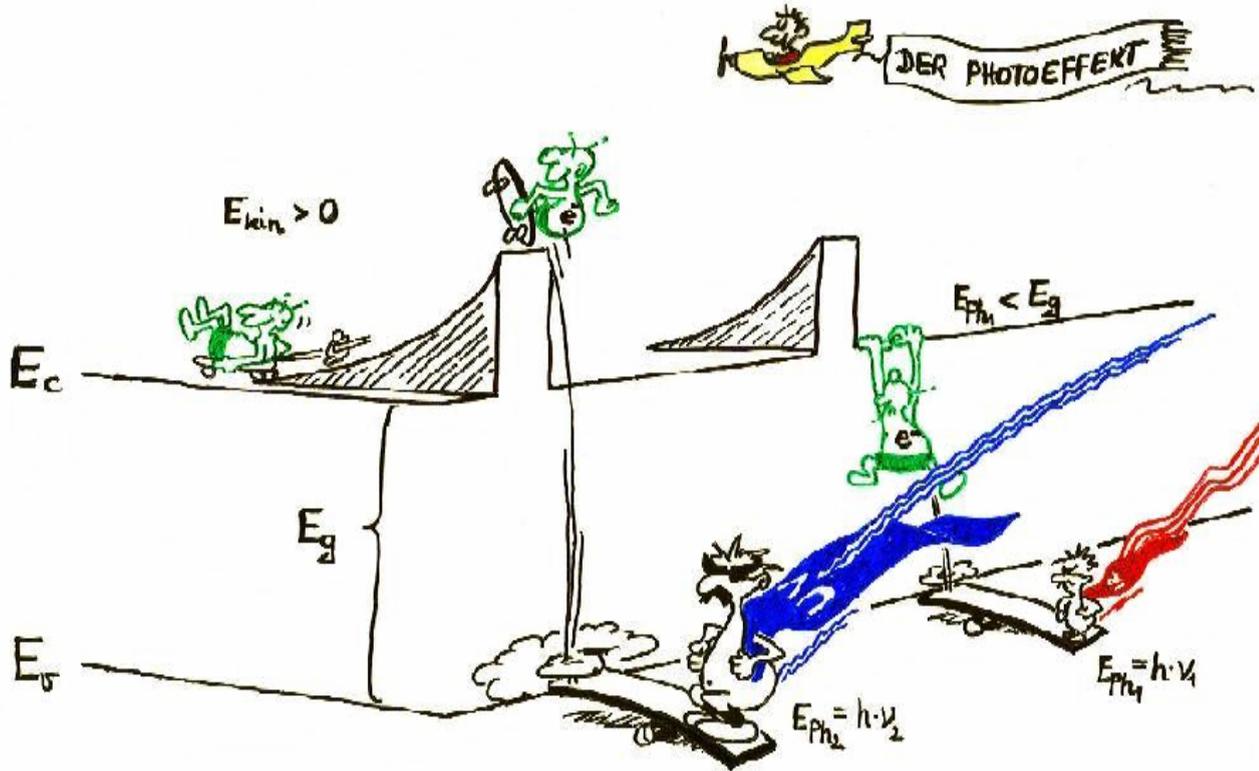


# Aufbau und Funktionselemente der Solarzelle



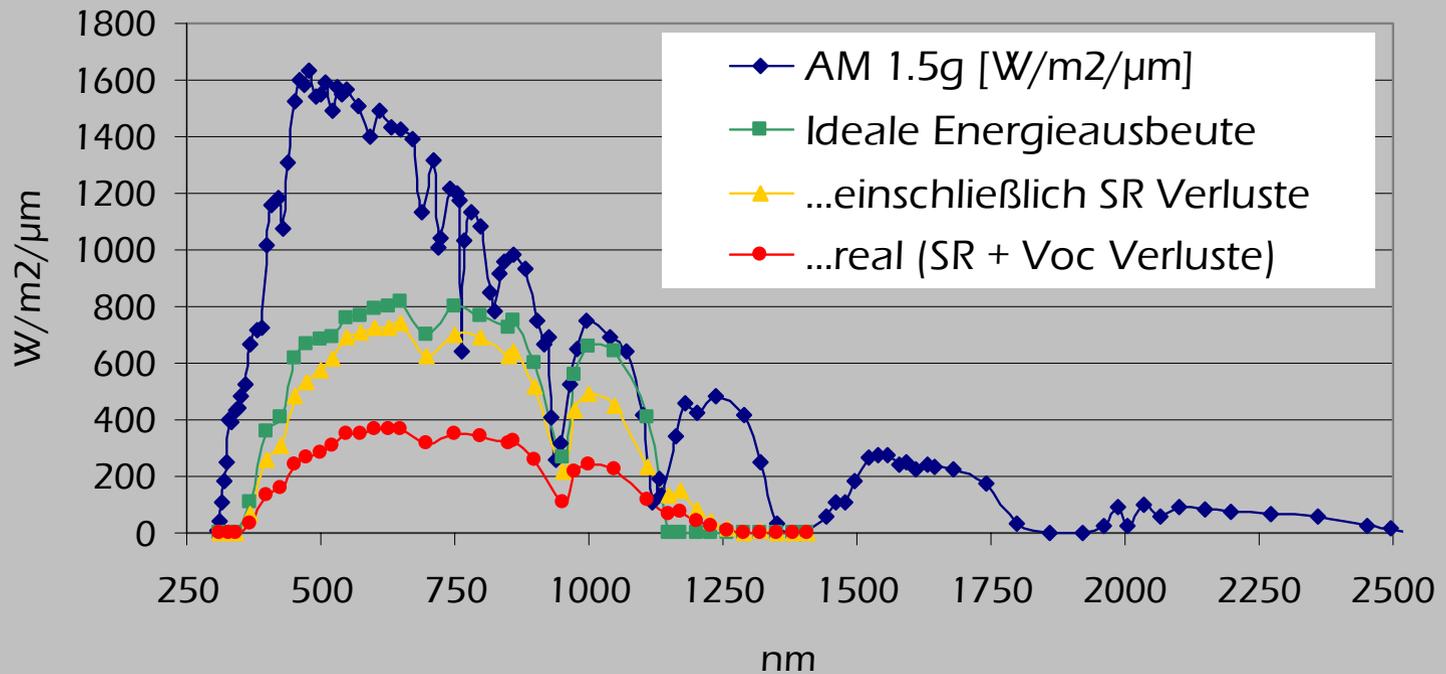
1. Absorption / Reflexion / Transmission
2. Generation Elektron-Lochpaar
3. Diffusion
4. Ladungstrennung

# Zuviel oder zuwenig Photonenenergie?



Quelle: nach Bubenzer, Luther, Photovoltaic Guidebook for Decisionmakers

# Ideale und reale Energieausbeute einer Einfachsolarzelle [Eg: 1.1 eV]

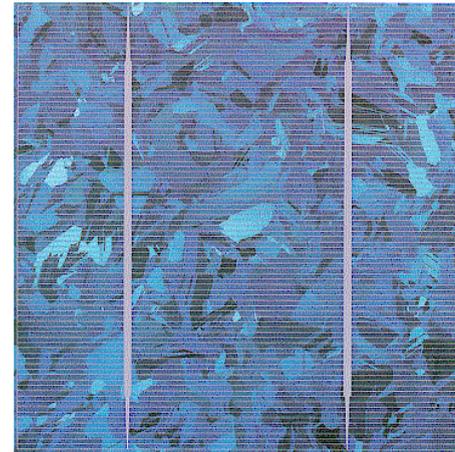


# Theoretische und praktisch erzielte Solarzellenwirkungsgrade

	Theorie	Praxis
Carnot Begrenzung <small>(fokussierte Solarstrahlung, Multi-Tandemzelle)</small>	95 %	40.7 %*
Nichtfokussierte Solarstrahlung <small>(Multi-Tandemzelle)</small>	66 %	< 30 % / < 25 % Labor / Fertigung
Einfachzelle <small>(Nichtfokussierte Solarstrahlung)</small>	31 %	<25 % / < 20 % Labor / Fertigung

\* Spectrolab 12/06

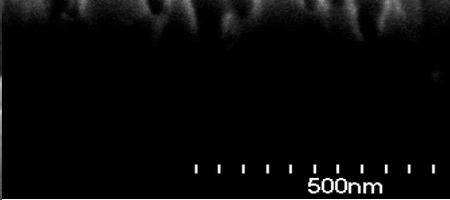
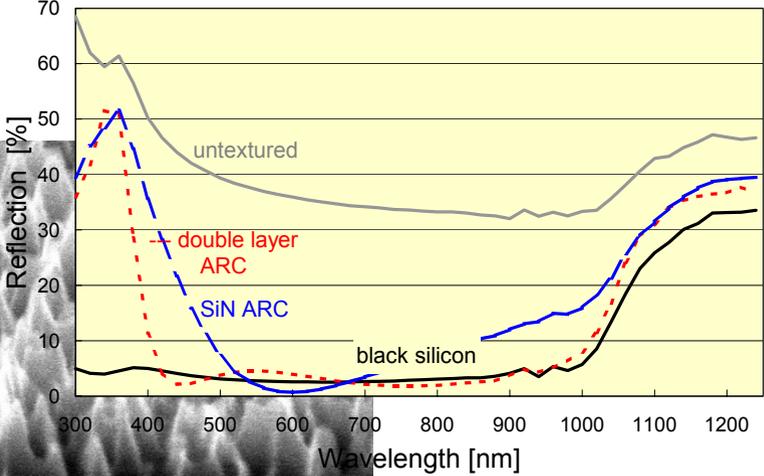
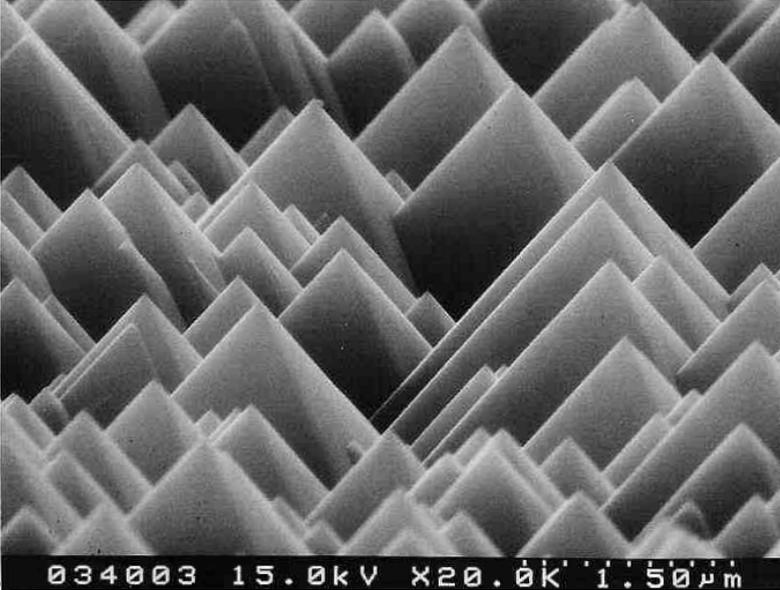
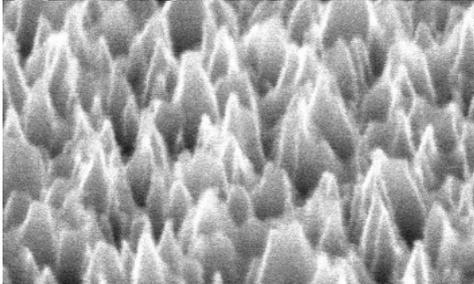
# Reduktion optischer Verluste (1): Entspiegelung



Nach SiN Antireflexbeschichtung

Nach Sägeschadenätzung

# Reduktion optischer Verluste (2): Oberflächentexturierung

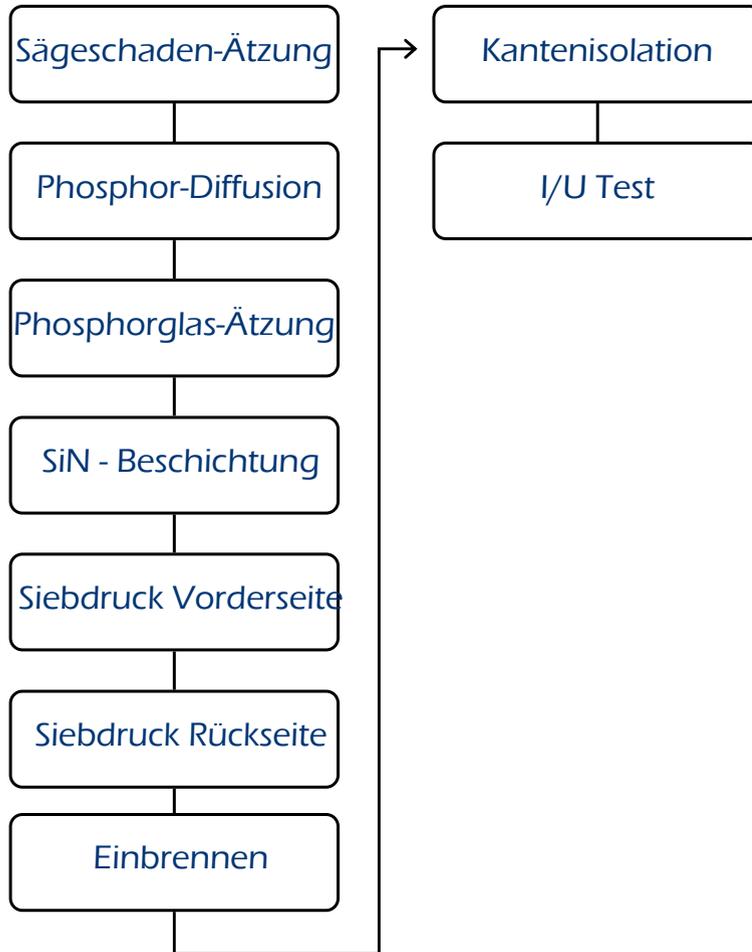


Plasma Etched „Black Silicon“

KOH geätzte [100] Mono-Silizium



# Standard Solarzellen-Prozess für kristallines Silizium



- Saure Texturätzung
- POCI Diffusion
- Al-BSF Rückseite
- Laser-Kantentrennung

Einsetzbar sowohl für Mono  
als auch Multi Si Wafer

# Neue produktive Diffusionstechnologien

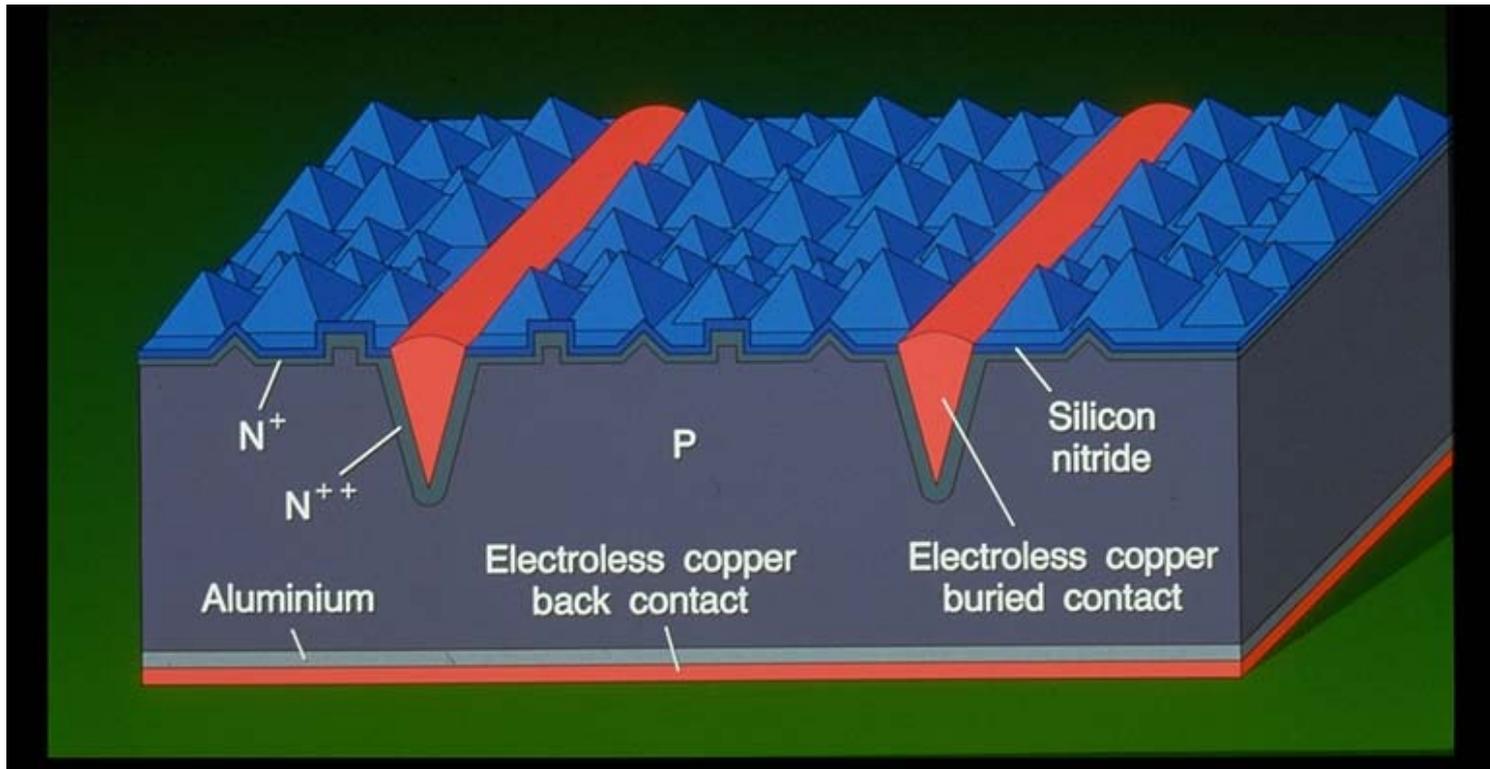


**Mehrstockofen**



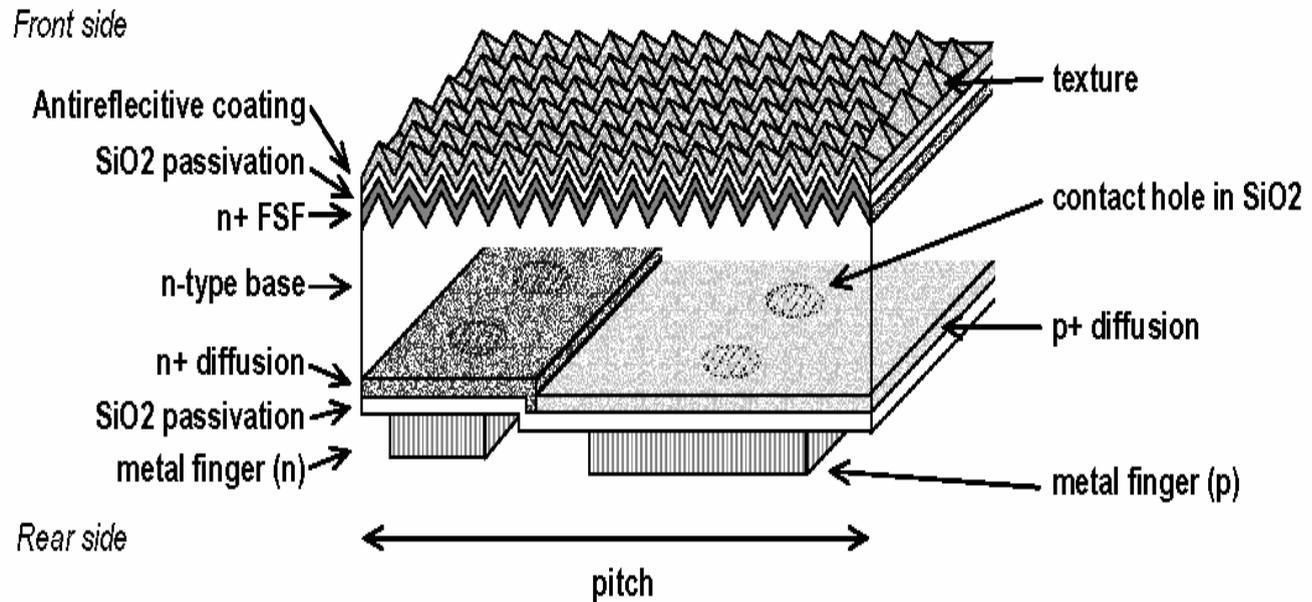
**Durchlaufofen**

# Reduktion optischer Verluste (3): Vertikales Grid



Quelle: BP Solar

# Reduktion optischer Verluste (4): Rückkontaktzelle



Quelle: Sunpower

# Zwischenbilanz Si-Photovoltaik

- Dominante Technologie (95%)
- Robuste, standardisierte Fertigungstechnologie
- Lange Lebensdauer praktisch demonstriert
- Kritische Masse an F&E, Anlagenbauern und Produzenten
- Materialintensiv



# Übersicht

- Kommerzielle Photovoltaik-Technologien:
  - 1. Generation: kristallines Silizium
  - 2. Generation: Dünnschichttechnologie
- Anwendungen
- 3. Generation und Ausblick:  
Tandemzellen und Konzentratoren

# Alternative PV Herstellkonzepte



Silicon



Ingot



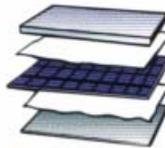
Wafer



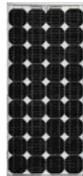
Solar cell



Circuit



Encapsulation



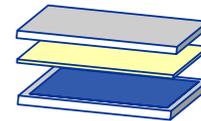
Module



Cu, In, Se oder  $\text{SiH}_4$



Verschaltete Zellenstruktur



Verkapselung



Modul

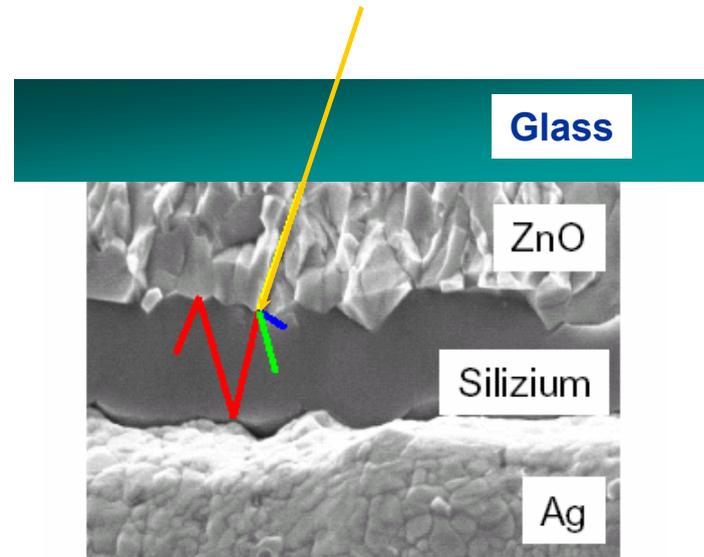
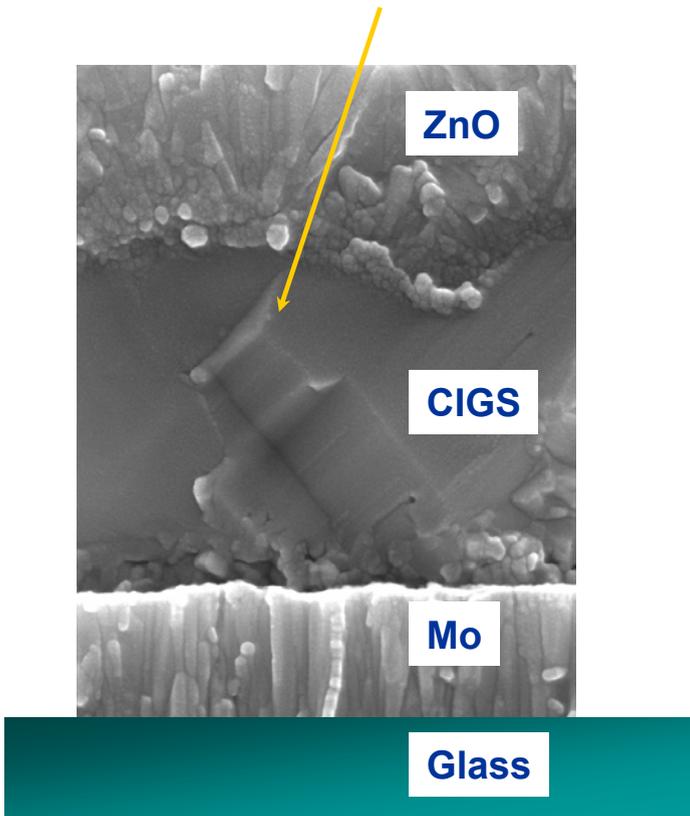
**Si-Wafer Analogie:  
Diskrete Elektronik**

**Dünnschicht-Analogie:  
Optik**

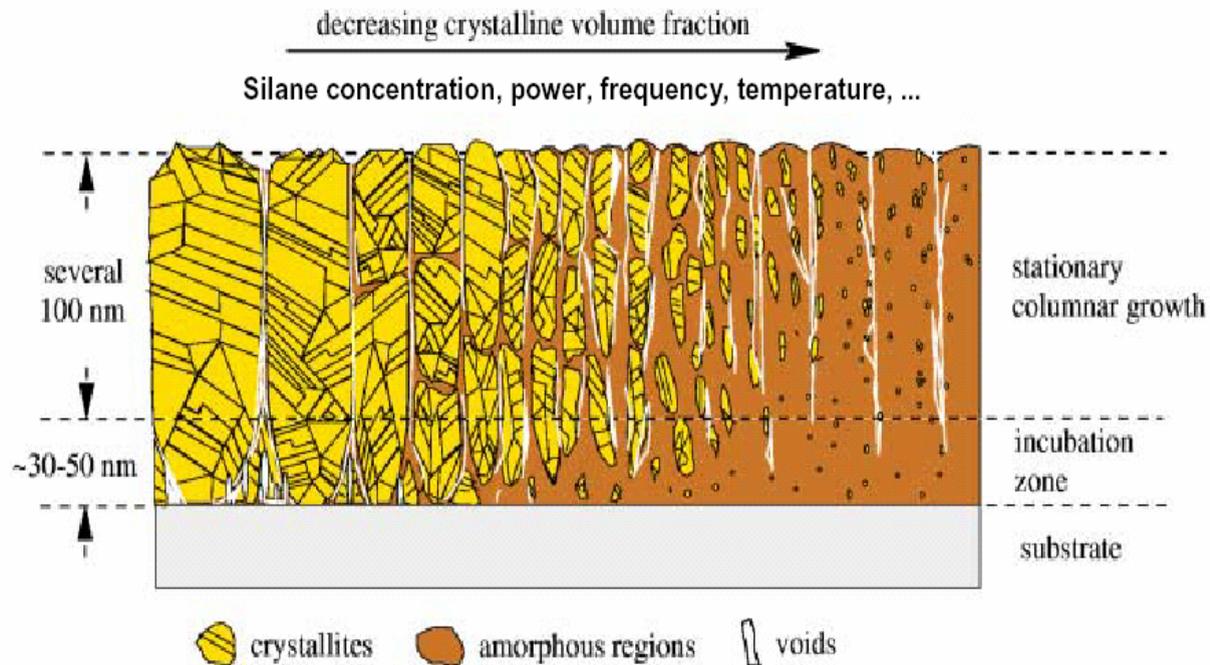
# Aufbau typischer Dünnschichtsolarzellen

**CIGS: Substrat-Konfiguration**

**a-Si: Superstrate-Konfiguration**



# Kontrolle der Kristallinität von Si-Dünnschichten in der PECVD Beschichtung



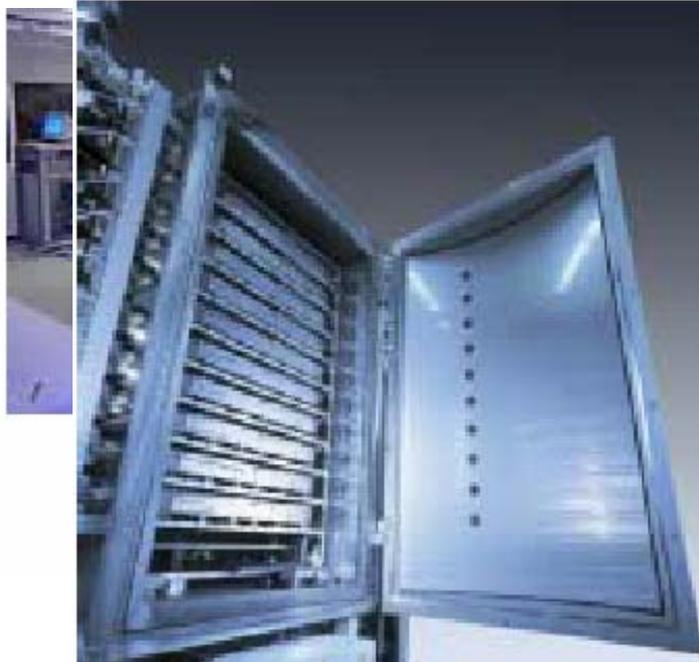
O. Vetterl et al., Solar Energy Materials and Solar Cells 62 (2000) 97-108

# Kritische Dünnschichttechnologien (1): PECVD Anleihen bei der FPD Industrie



1100 x 1250 mm<sup>2</sup> glass  
deposited with a-Si

Quelle: Oerlikon



# Kritische Dünnschichttechnologien (2): Sputtern Anleihen bei der Architekturglasindustrie

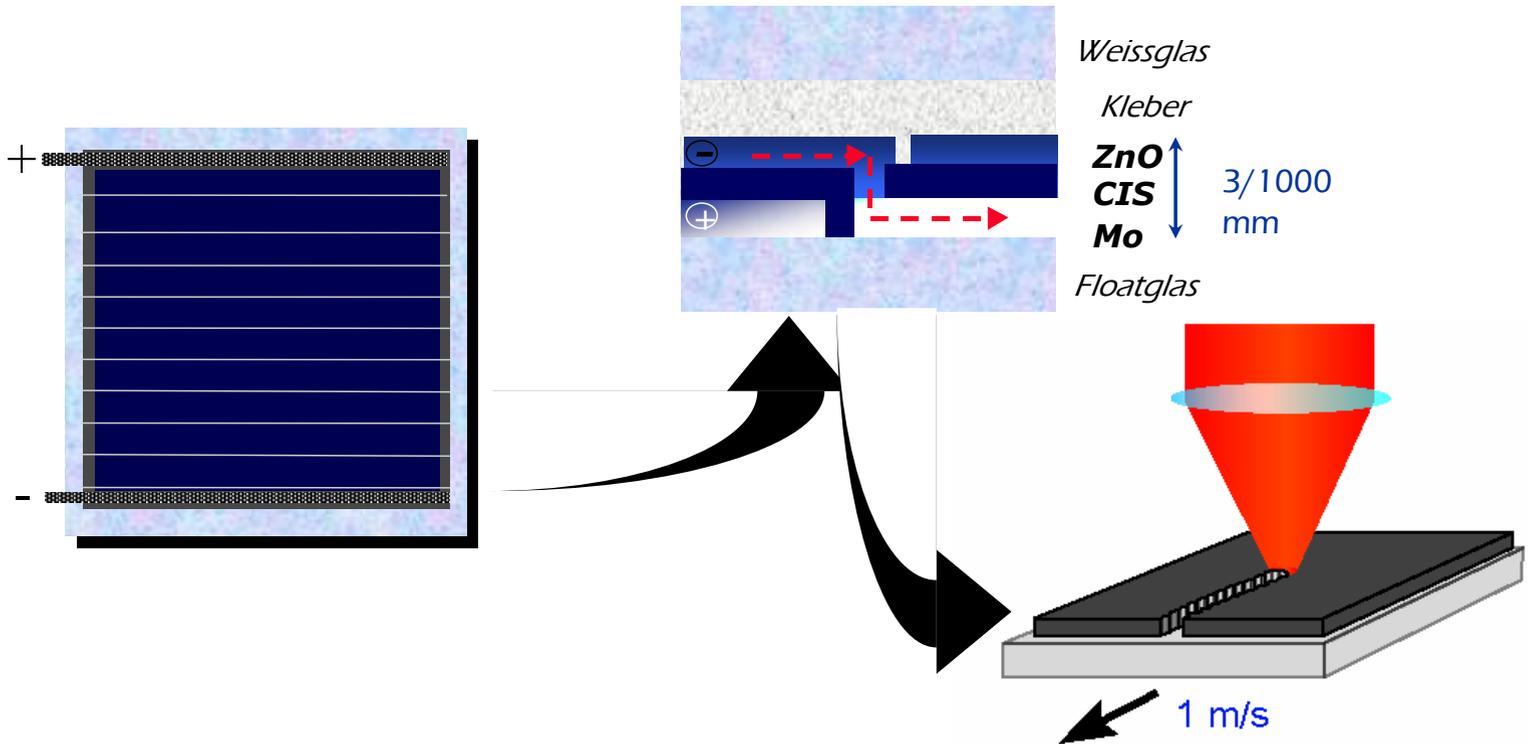
Substratglasbeschichtung auf 3.20m  
Substratbreite



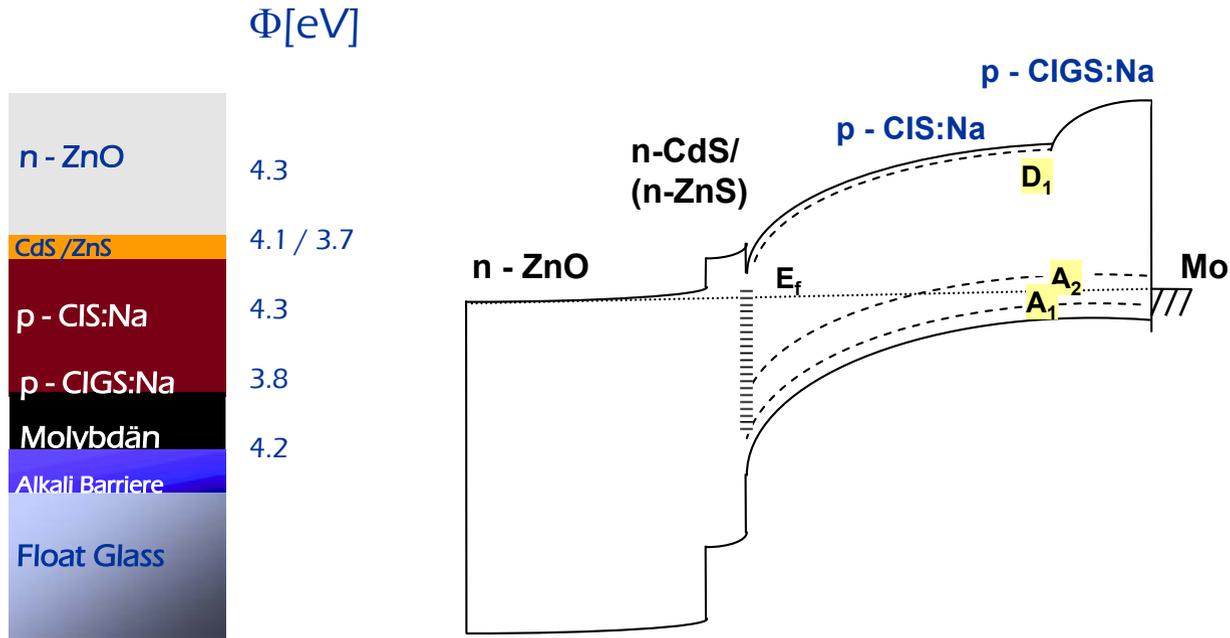
Quelle: GL Coating

# Integrierte Verschaltung in der Dünnschicht-PV

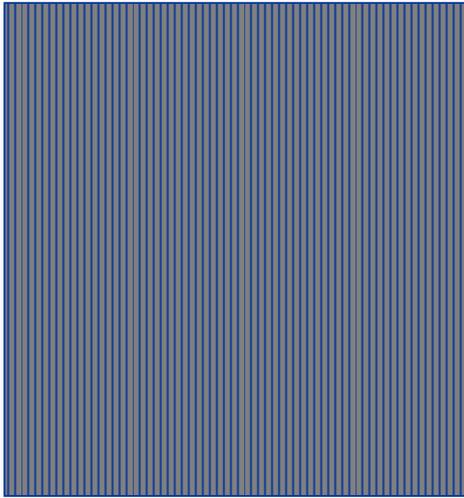
CIS als Absorberschicht hier exemplarisch (alt. CdTe, a-Si, Org. HL)



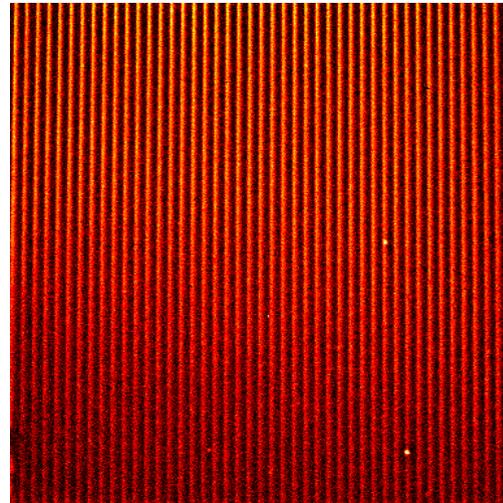
# Bänderschema einer CIS Solarzelle



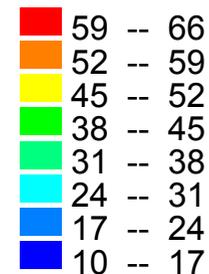
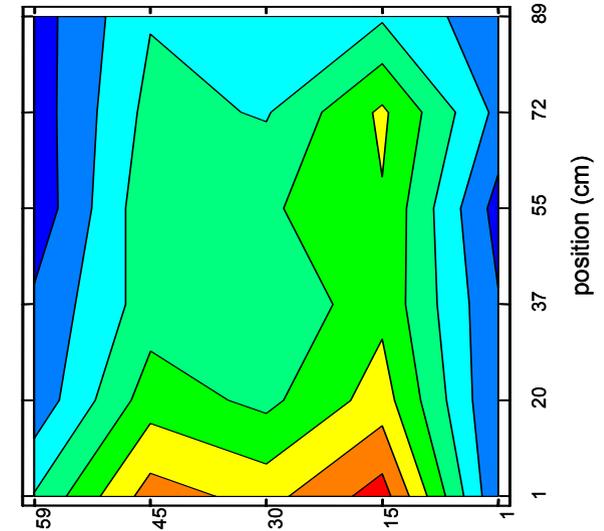
# Neue Materialien verlangen neue Charakterisierungsverfahren für große Flächen



30 x 30 cm<sup>2</sup> CIS Modul



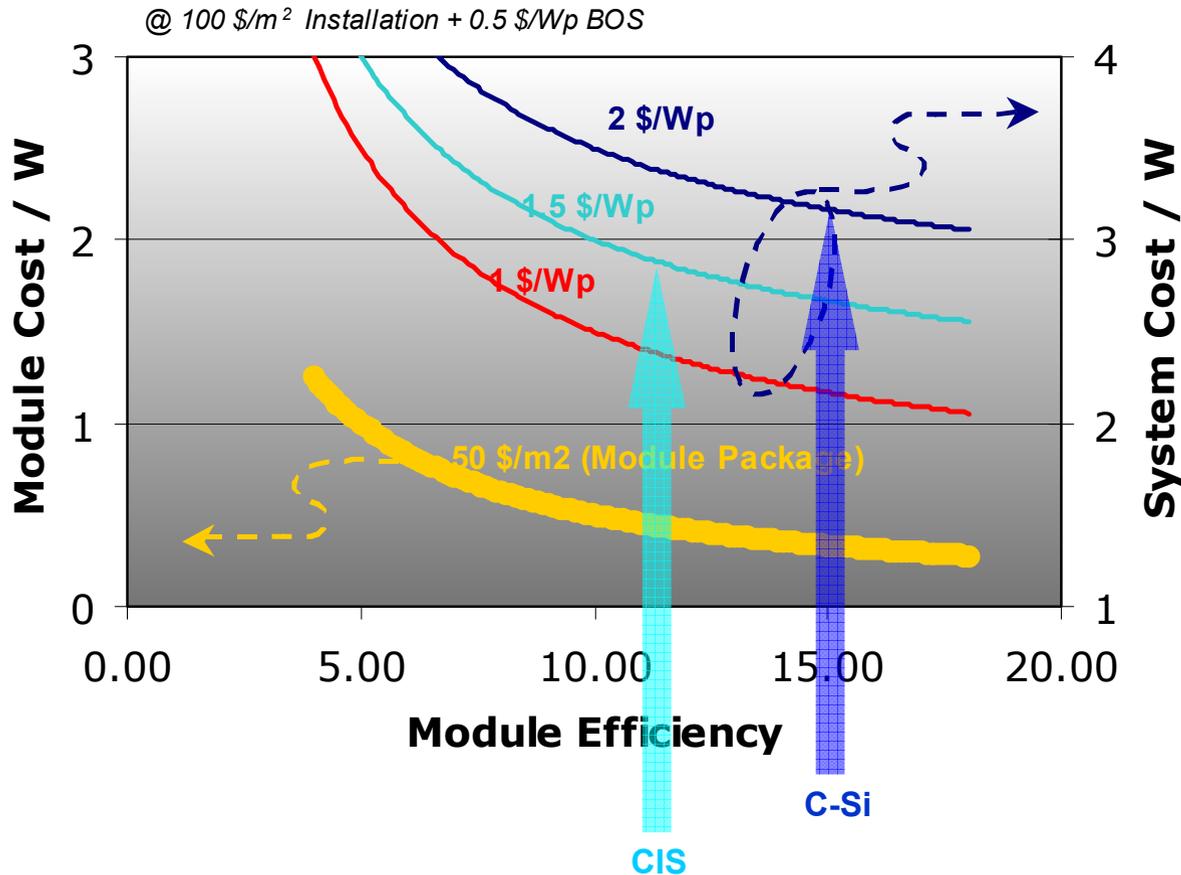
Lock-in  
Thermographie  
(Shunt Hunting)



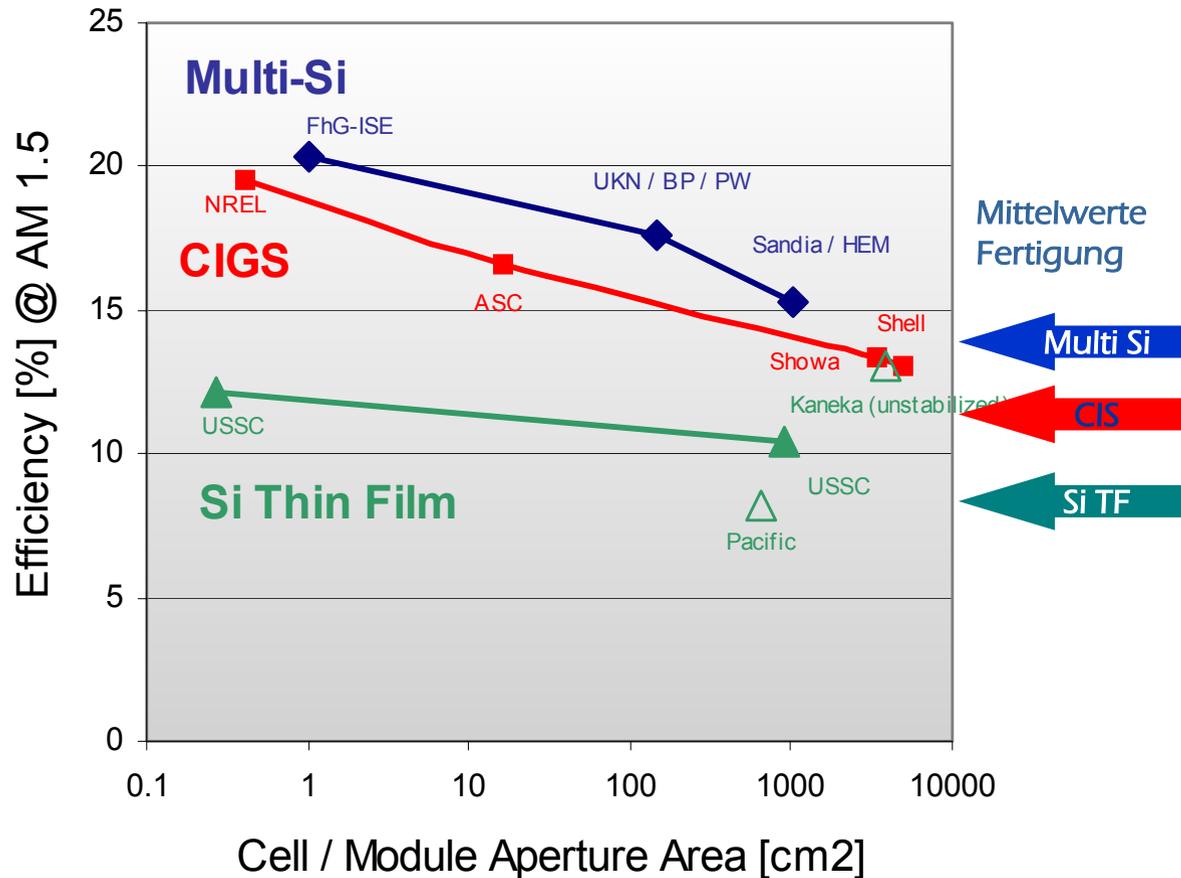
Photoluminescence  
lifetime (ns) on  
60 x 90 cm<sup>2</sup>

# Die Rolle der Wirkungsgrades:

Feste flächenbezogene Kosten erfordern hohe Wirkungsgrade



# Übersicht Wirkungsgrade: Vom Labor-Weltrekord zum Fertigungsdurchschnitt



# Zwischenbilanz Dünnschicht-Photovoltaik

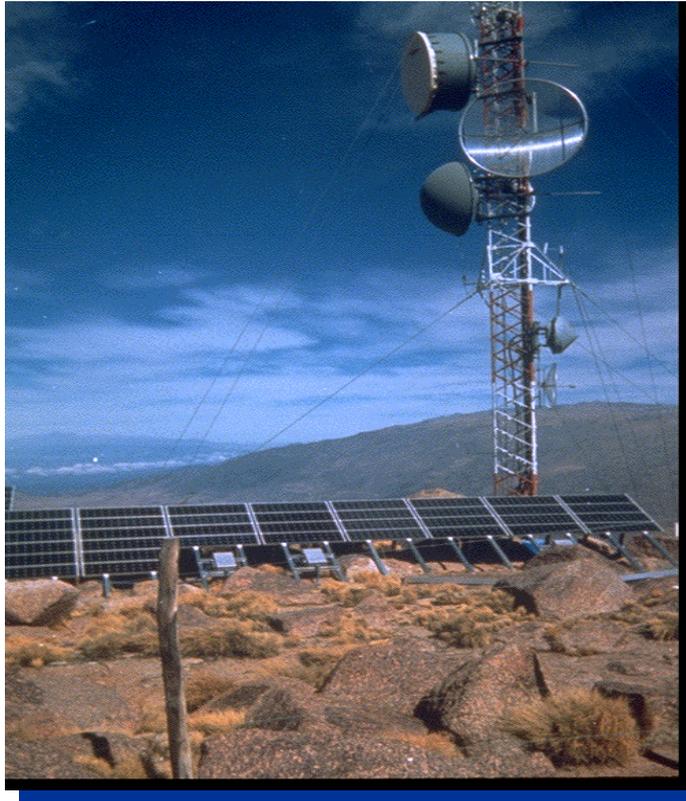
- Kostengünstige Fertigungsverfahren verfügbar
- Konkurrenzfähige Wirkungsgrade demonstriert
- Integrierte Verschaltung gute Voraussetzung für lange Lebensdauer, im Klimatest und an frühen Prototypen bereits demonstriert
- F&E Infrastruktur verbesserungswürdig
- Bisherige Fertigungseinheiten zu klein



# Übersicht

- Kommerzielle Photovoltaik-Technologien:
  - 1. Generation: kristallines Silizium
  - 2. Generation: Dünnschichttechnologie
- Anwendungen
- 3. Generation und Ausblick:  
Tandemzellen und Konzentratoren

# Netzferne PV Anwendungen oft kostengünstigste Lösung (keine Subventionen)



# PV Aufdachanlagen mit 1-5 kW Nennleistung



# Ästhetische Aspekte bei der PV Gebäudeintegration

Multikristallines Silizium Modul

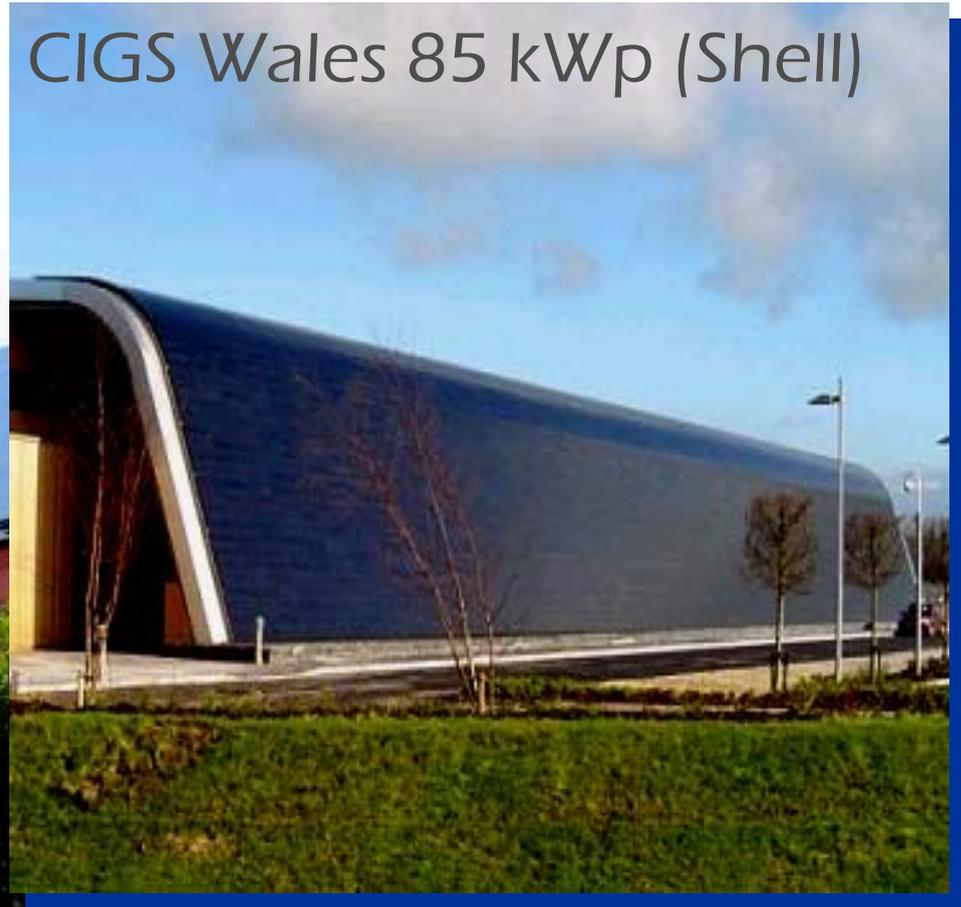


CIS-Dünnschichtmodul



# Gebäudeintegration von Dünnschichtmodulen (1)

CIGS Wales 85 kWp (Shell)



CIGS Tübingen

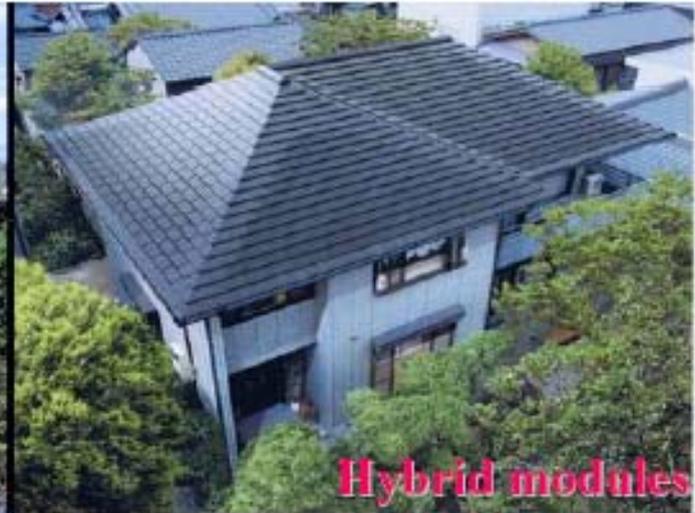


# Gebäudeintegration von Dünnschichtmodulen (2)



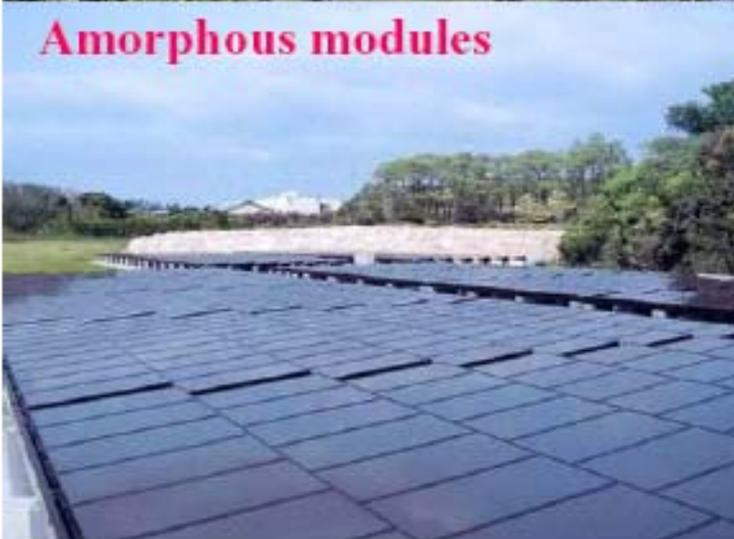
# Installation sites in Japan

**Hybrid modules**

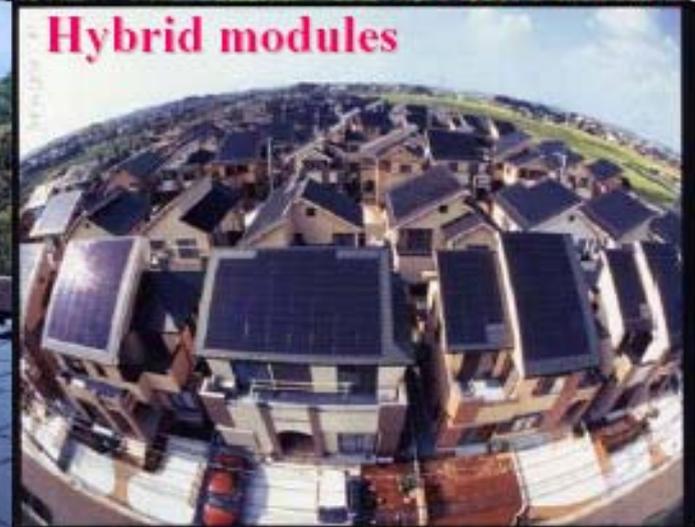


**Hybrid modules**

**Amorphous modules**



**Hybrid modules**



# Multi-MW Grünflächenanlagen für Investmentfonds



Höslwang 1.8 MW



Espenhain 5 MW



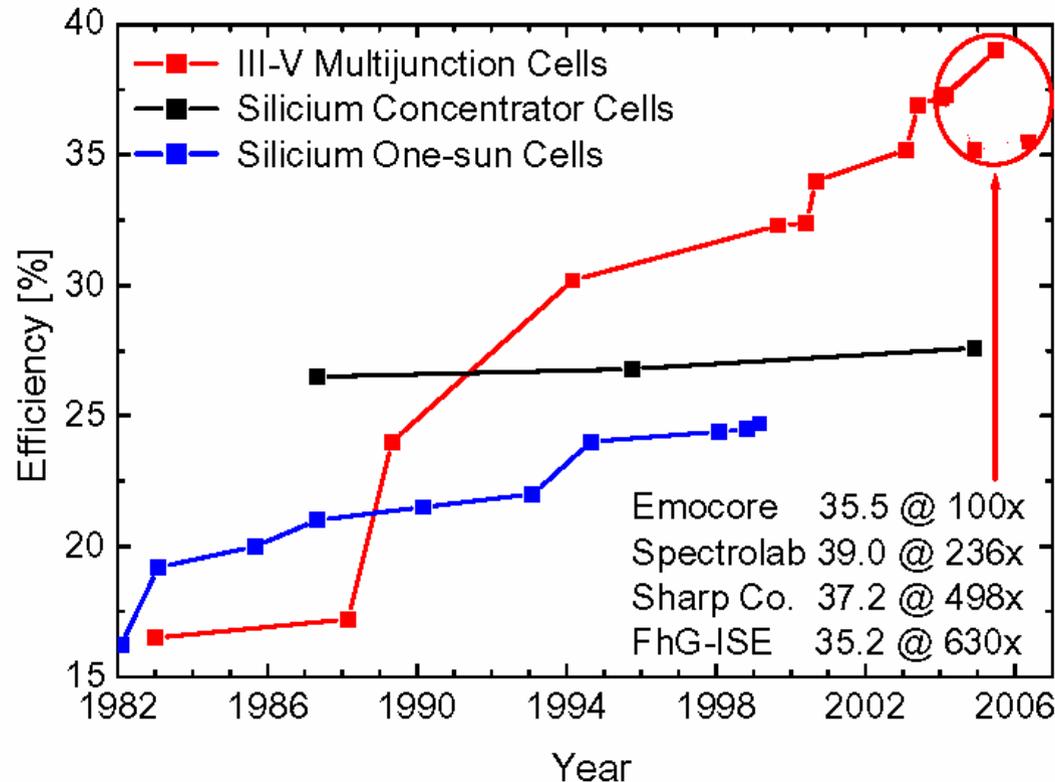
Pocking 10 MW



# Übersicht

- Kommerzielle Photovoltaik-Technologien:
  - 1. Generation: kristallines Silizium
  - 2. Generation: Dünnschichttechnologie
- Anwendungen
- 3. Generation und Ausblick:  
Tandemzellen und Konzentratoren

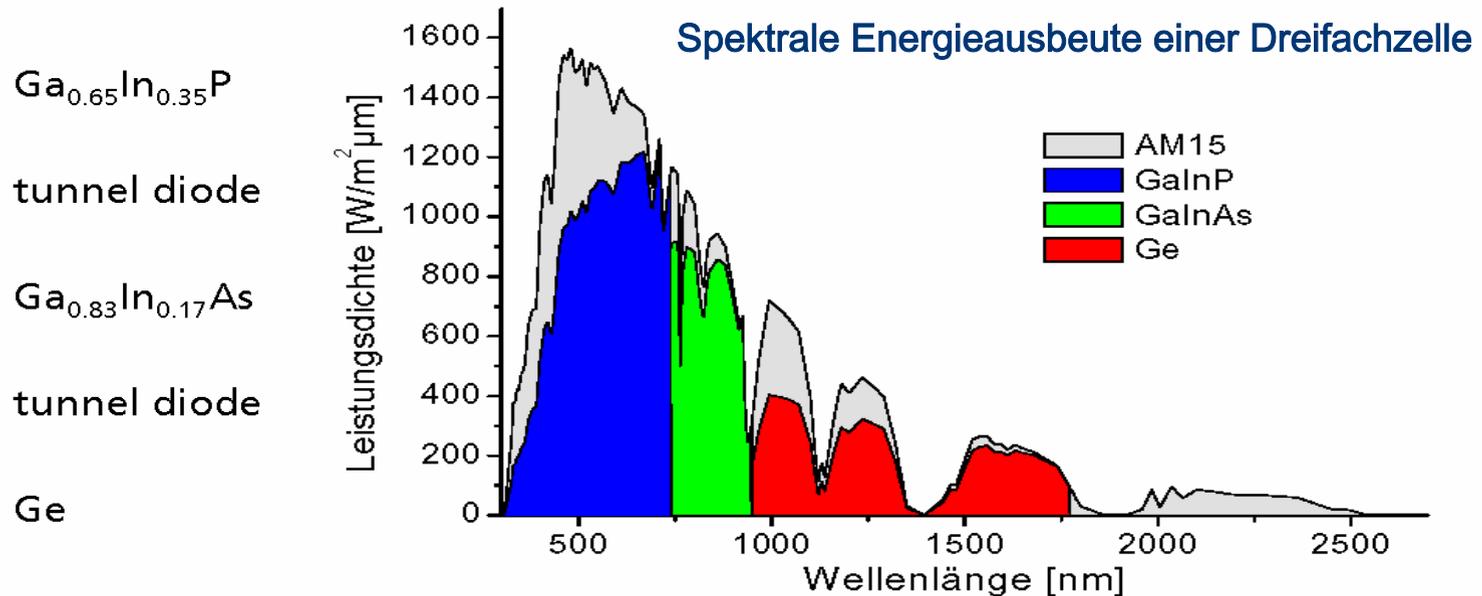
# Signifikante Fortschritte bei Tandemzellen für Weltraum- und Konzentratoranwendungen



Latest News: 40.7%  
mit Triple Junction  
(Spectrolab 12/06)

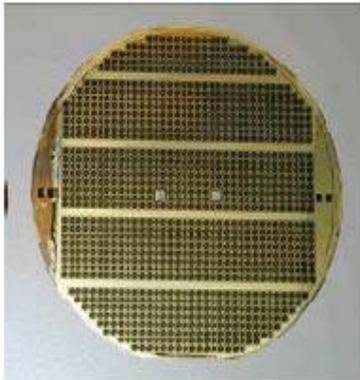
# Aufbau einer Dreifach-Solarzelle

- MOCVD Epitaxie auf 4 Zoll Germaniumwafern
- Kommerzielle Fertigung für Weltraumanwendungen
- Erste Pilotprojekte für terrestrische Anwendungen

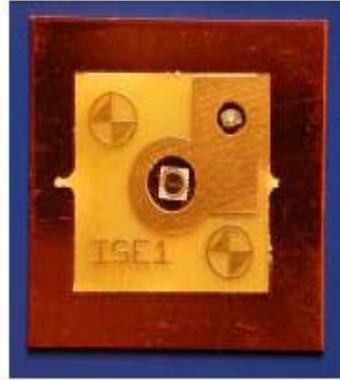


Quelle: FhG-ISE

# Vom Wafer zum Kraftwerk mit konzentrierenden Photovoltaik Systemen



4-Zoll Wafer mit PV-Zellen  
höchsten Wirkungsgrads



Zelle und Kühlkörper



Tracker



PV Kraftwerk

Quelle: FhG-ISE

In Pilotprojekten zu zeigen:

- Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit
- Wartungsaufwand

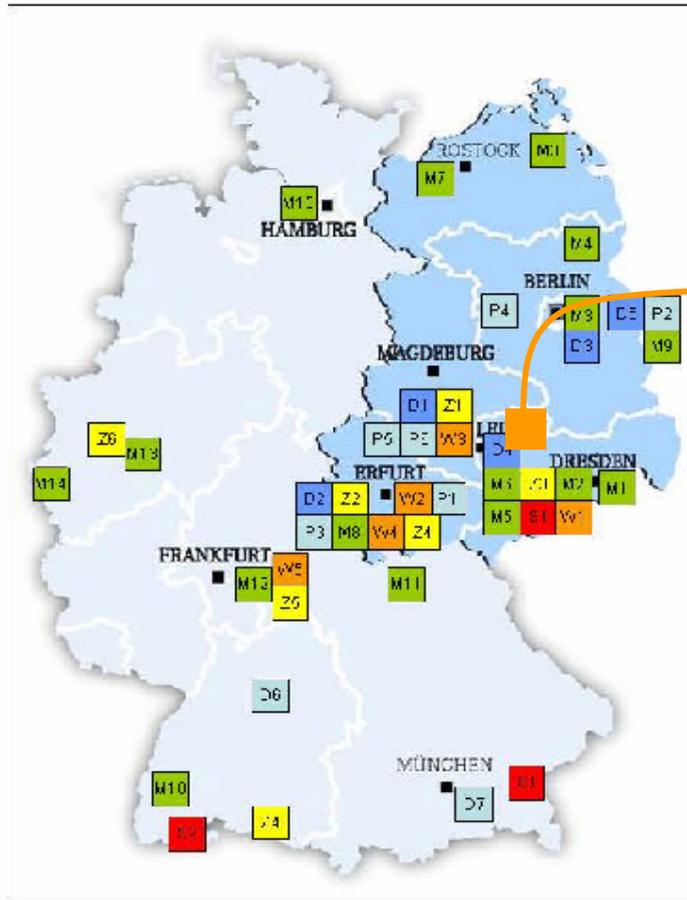
# Weitere alternative Zellenkonzepte werden erforscht, entwickelt und erprobt

- Farbstoffsensibilisierte Zellen (Grätzelzellen)
- Organische Solarzellen
- Energiekonversion (Up & Down Conversion)

# Zusammenfassung

- Umbau unserer Energieversorgung benötigt einen höheren Anteil regenerativer Energiequellen
- Photovoltaik könnte dafür mittelfristig einen wichtigen Beitrag liefern, Industrie befindet sich im Aufbau
- Kristallines Si ist dominante Basistechnologie mit allen technischen Voraussetzungen (Wirkungsgrad, Stabilität)
- Weitere Kostensenkungen erfordern zusätzliche Innovationen, z.B.
  - Dünnschichttechnologie
  - Konzentratorzellen

# AVANCIS Dünnschichtfertigung in 2008



Torgau / Sachsen:

- 20 MW CIS Solarmodule einer neuen Generation
- Vor Ort Integration von Glasindustrie und Halbleiterindustrie