

---

# Stand und Perspektiven der Photovoltaikforschung

---



S.W. Glunz

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

69. Jahrestagung der DPG, 9. März 2005

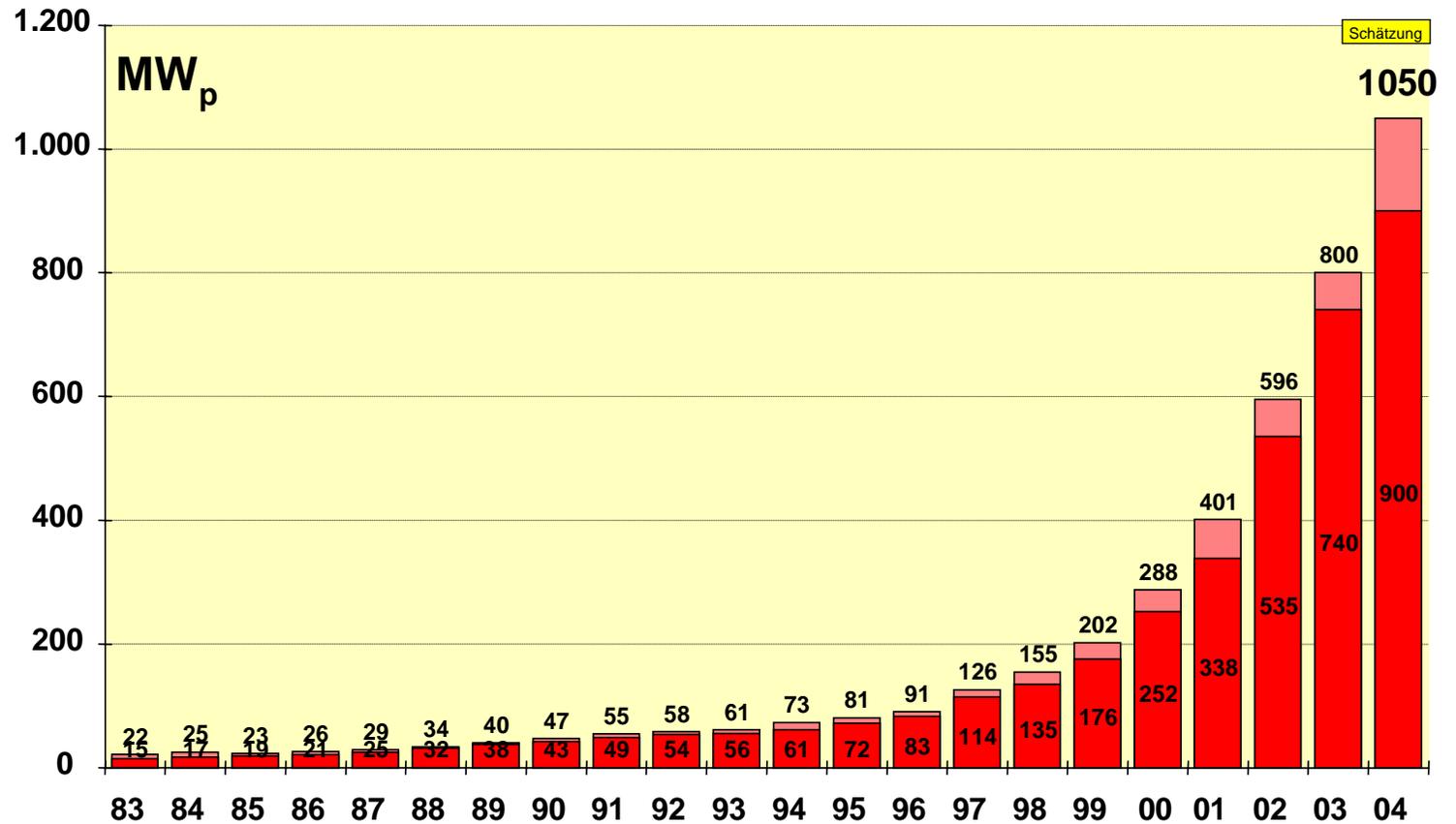
## Übersicht



- *Grundsätzliches*
- *Das Spektrum der Photovoltaik*
- *Das Arbeitspferd:*  
Die Siliciumsolarzelle
- *Ein Hauch von Photovoltaik:*  
Dünnschichtsolarzellen
- *Halbleiter ade:*  
Organische und Farbstoffsolarzellen
- *Jenseits der Shockley-Queisser Grenze:*  
Tandemsolarzellen und neue Konzepte

## Wachstum der Photovoltaik

30-40% Wachstum



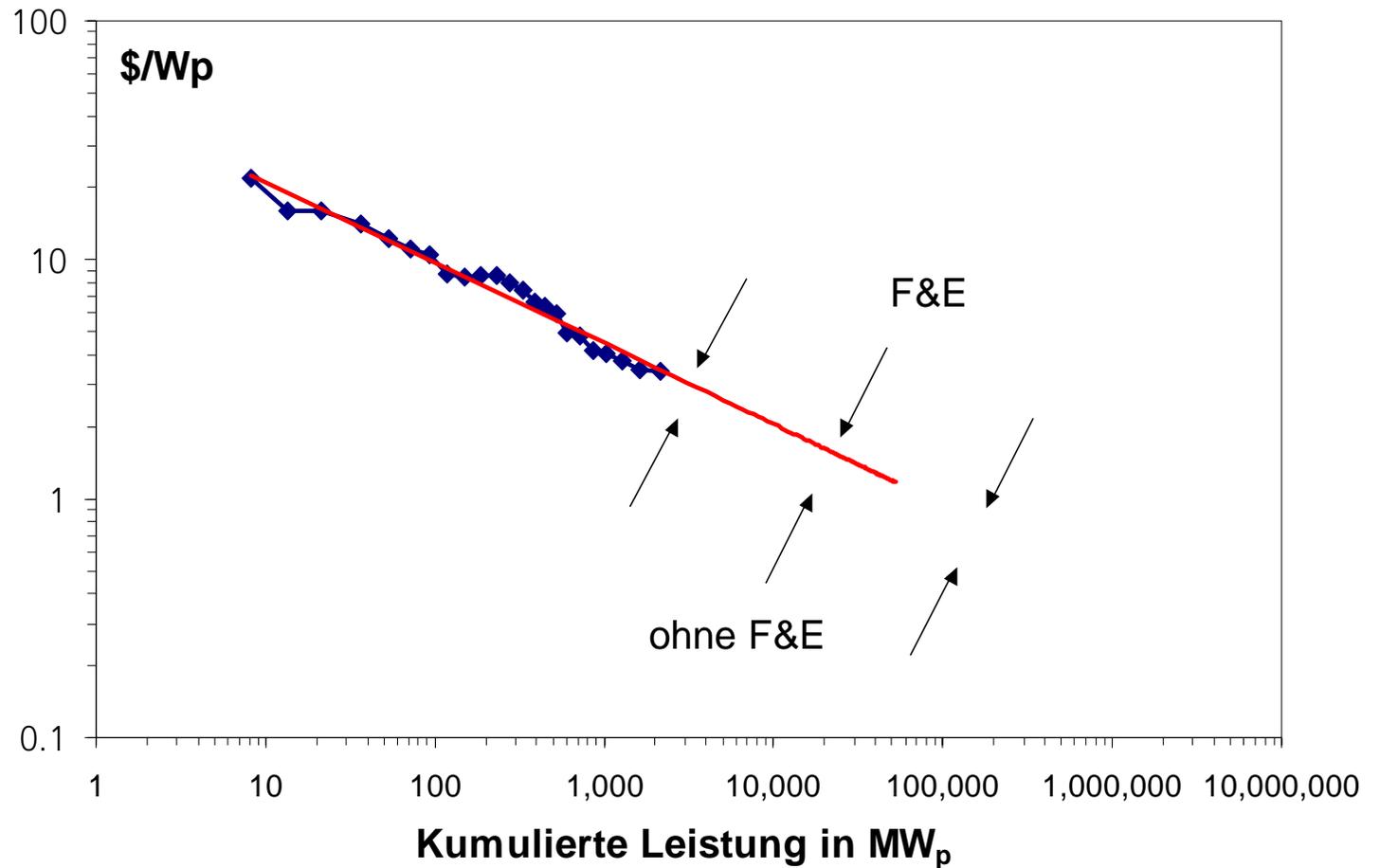
Quelle: Räuber PSE 2005

© 2005 Dr. A. Räuber, PSE



## Kostenentwicklung (Modulpreis)

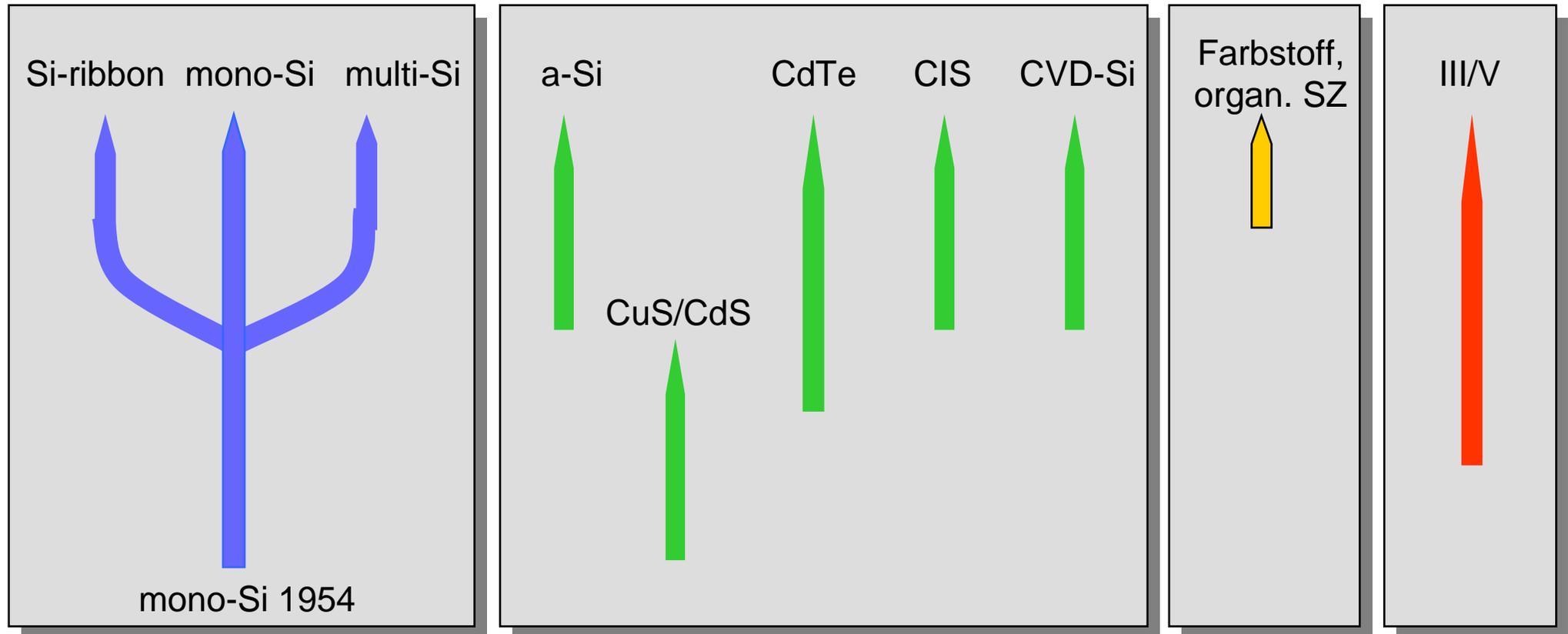
- Ziel 1 €/Wp
- Verdopplung kumulierte Leistung entspricht 20% Preisreduktion



Quelle: Räuber PSE 2003

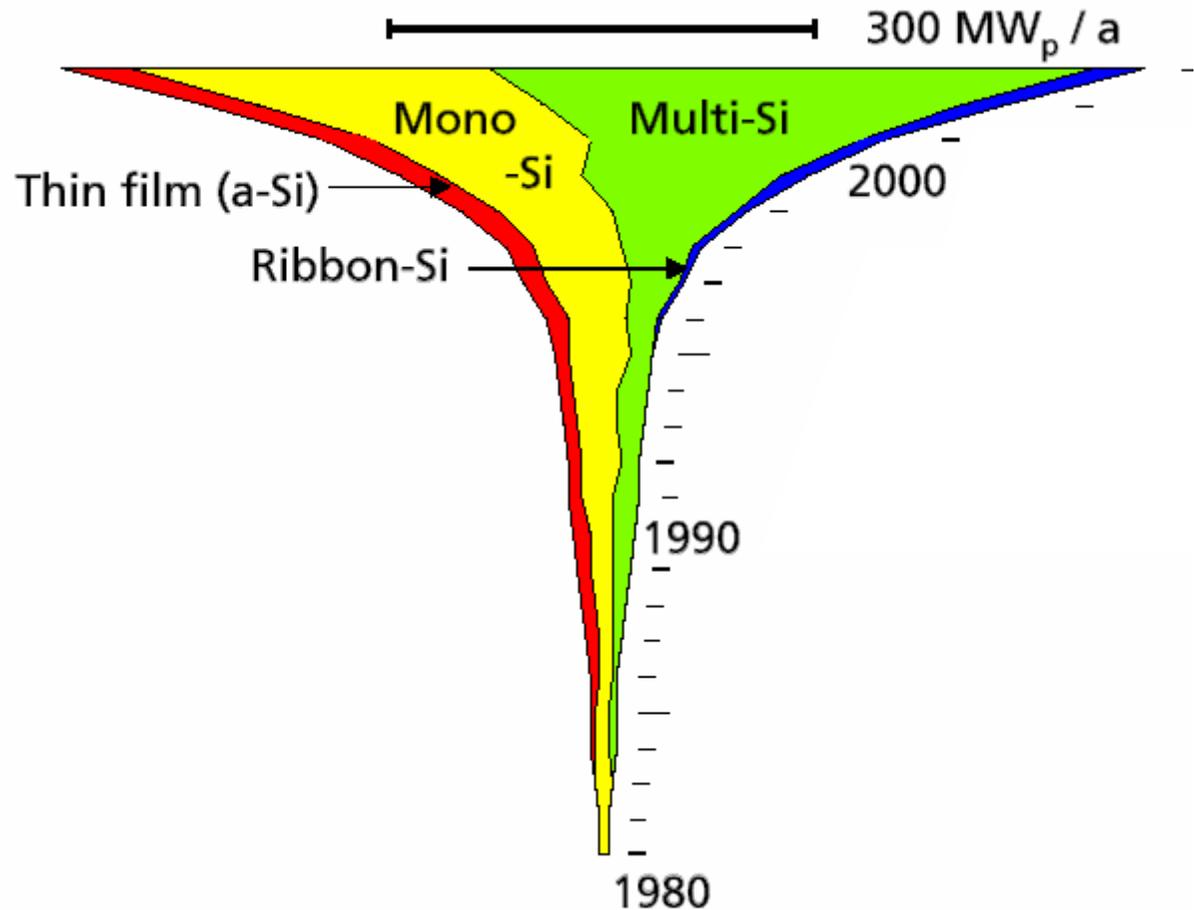
# Evolution photovoltaischer Technologien,

## Beispiele



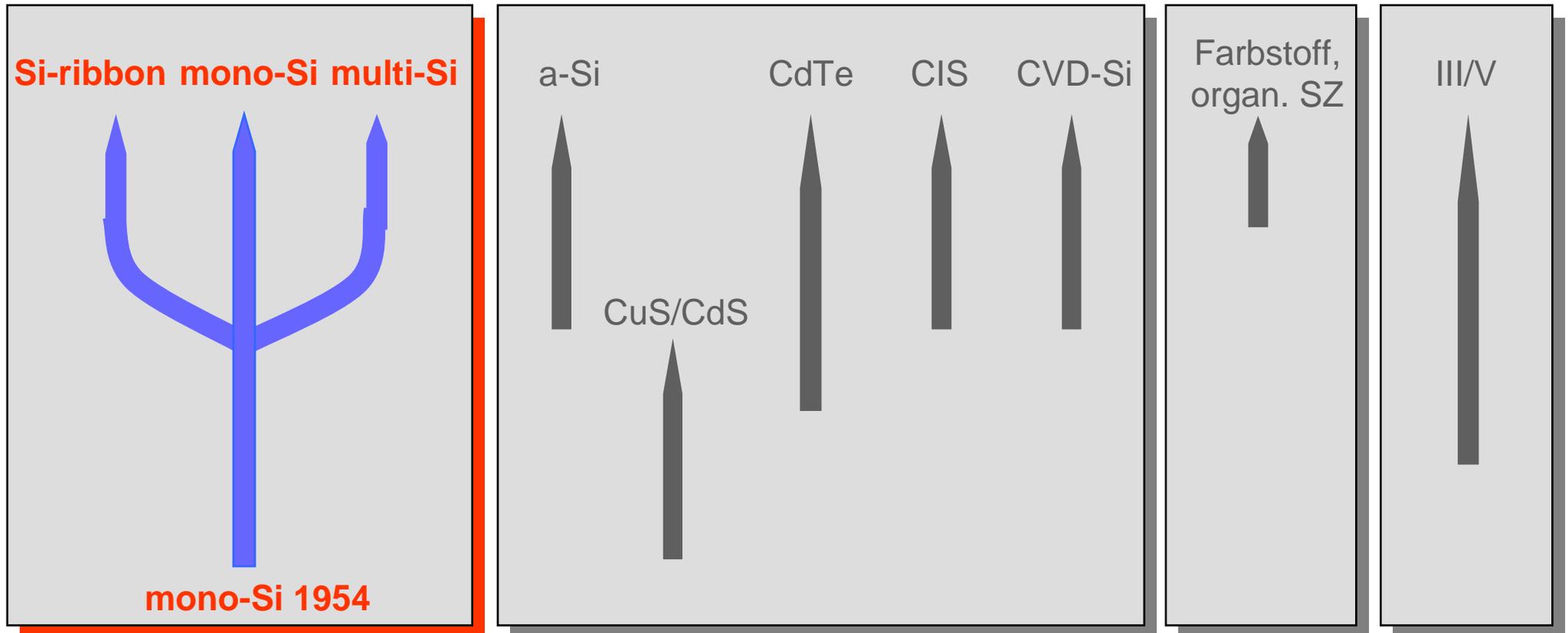
## Marktentwicklung

Solarzellen aus Wafersilizium dominieren den PV-Markt schon seit geraumer Zeit

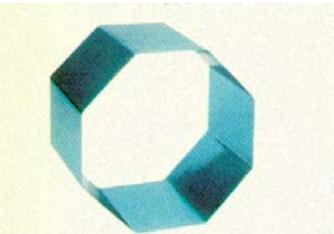


Quelle: G. Willeke, Fraunhofer ISE

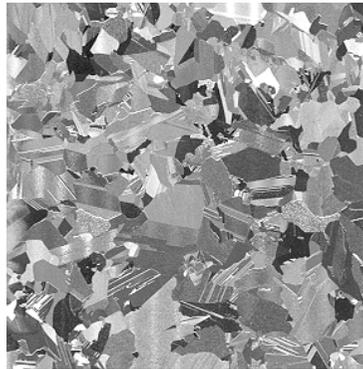
# Solarzellen aus Siliciumwafern



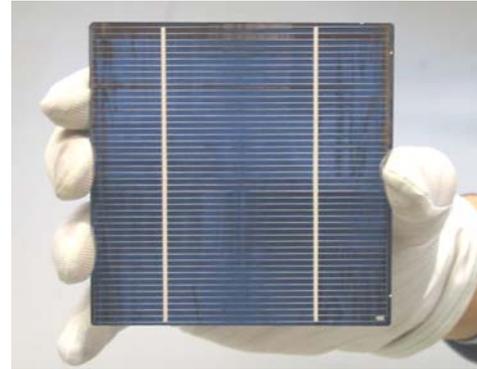
# Siliciumsolarzellen: Herstellungsprozess



Silizium



Wafer  
(Scheibe)



Solarzelle



Modul

## Energy Payback

**NELT = Net Energy Life Time**

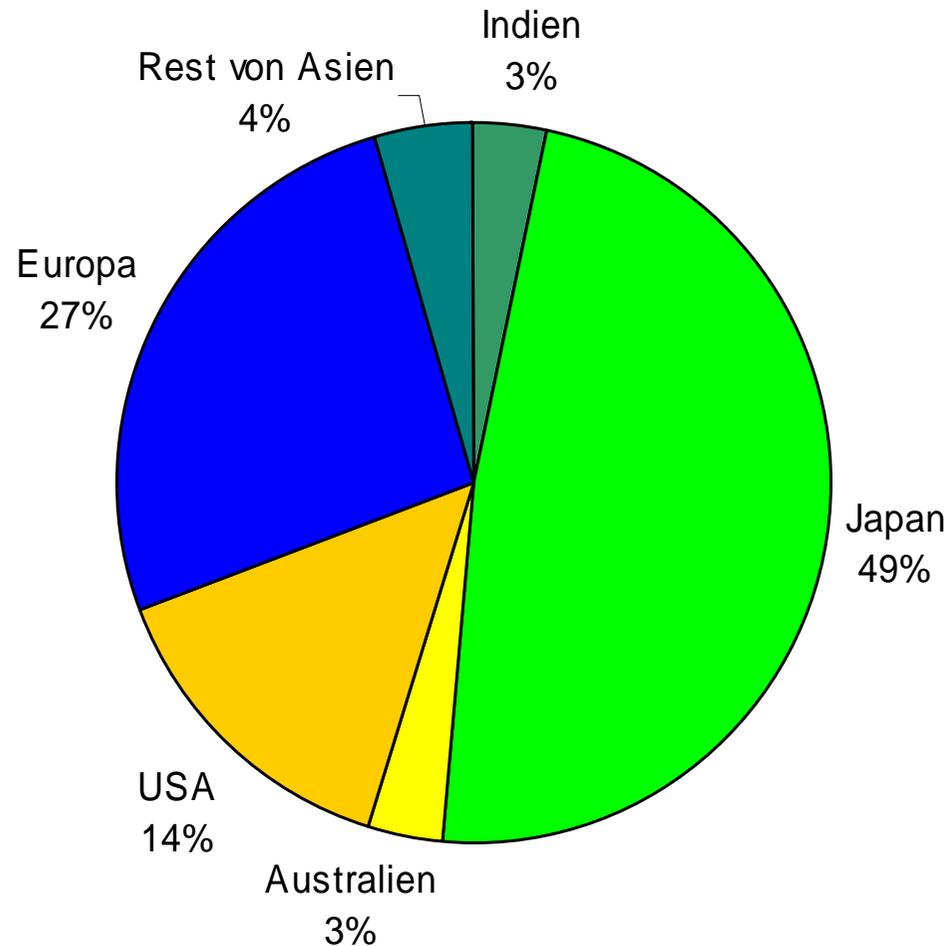
25 Jahre	(Lebensdauer des Systems)
- 3 Jahre	(Energy Payback Time, mc-Si in unseren Breitengraden)
<u>          </u>	
= 22 Jahre	(NELT)

⇒ Ca. 90 % der Lebenszeit eines Photovoltaikmodules dienen der Nettoenergieerzeugung!

Quelle: Photovoltaics for Decision Makers (Ed. Bubenzer/Luther), Springer Verlag 2003

## Produktion: Aufteilung nach Kontinenten

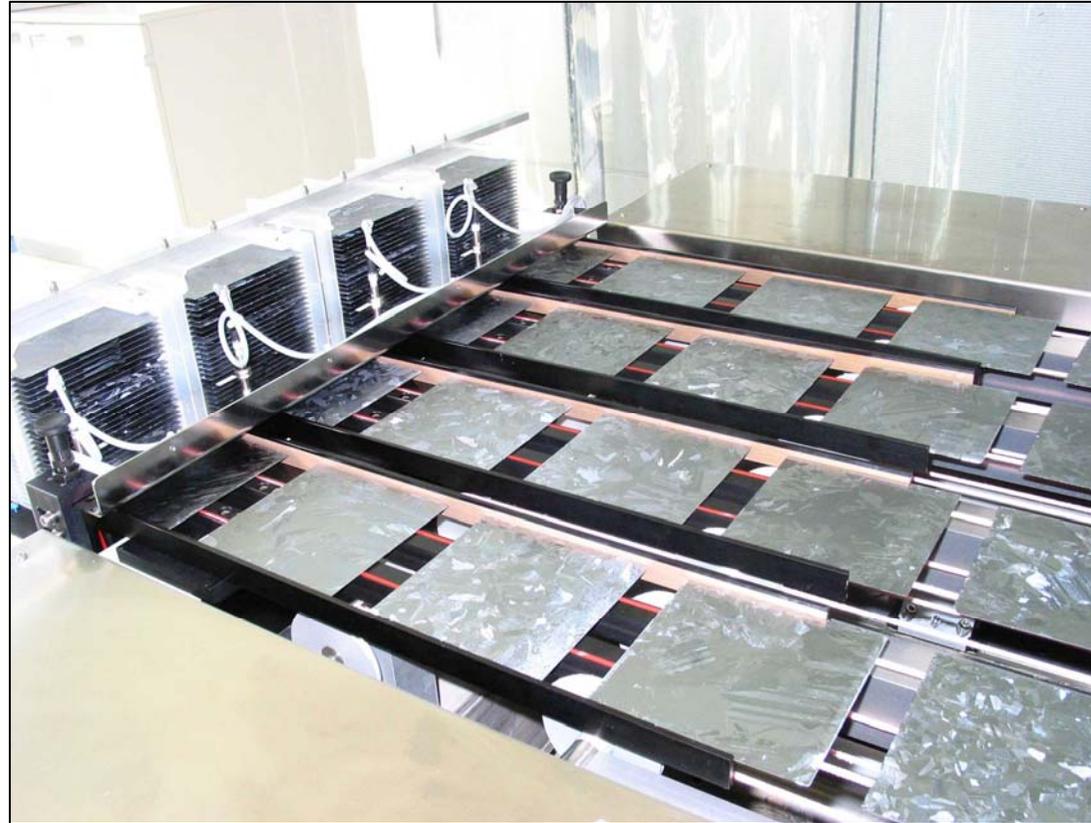
- Europa gut positioniert, aber massive Konkurrenz aus Japan
- Fa. Sharp (Japan): 198 MWp = 26% der Weltproduktion!



Quelle: Photon International 2004

## Produktionstechnologie

Die Solarzellenfabrik „von heute“:  
Hochautomatisierte Produktionsstätten ausgerüstet mit speziell für die Photovoltaik entwickelten Geräten.



Quelle: Fraunhofer ISE

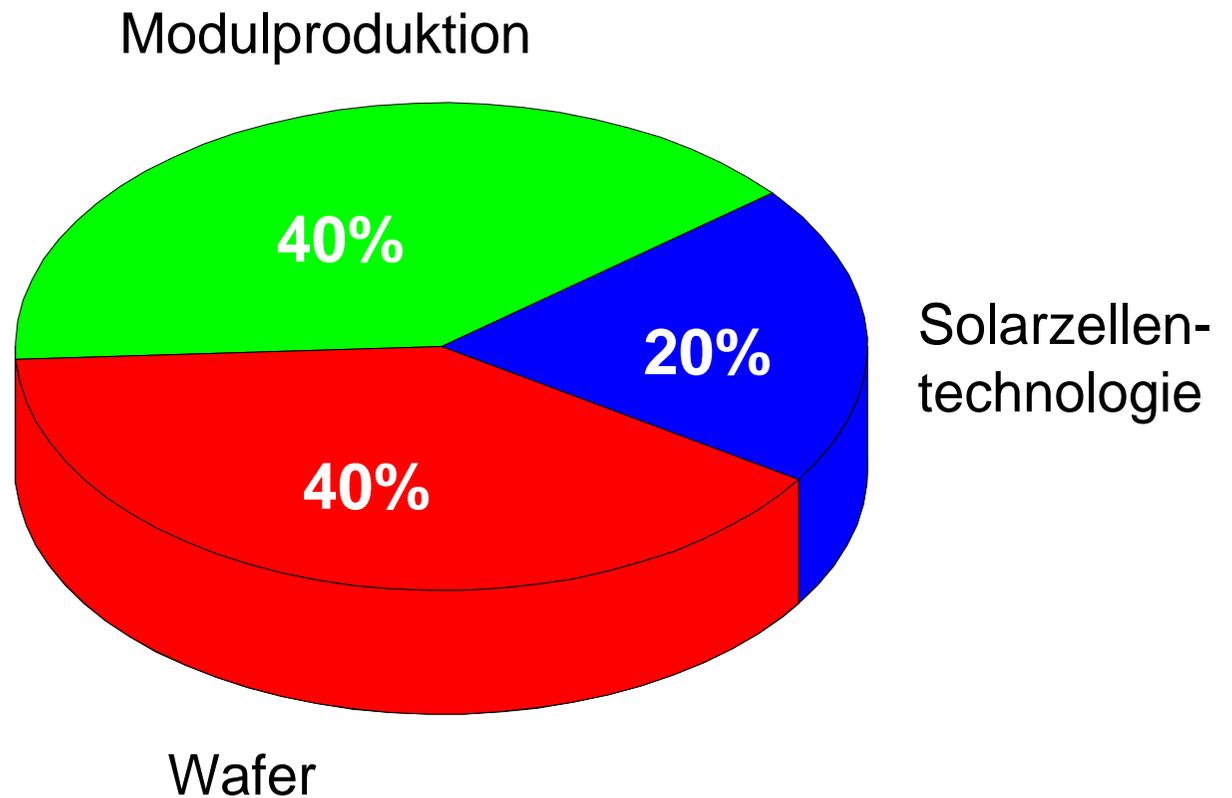
# Das Ziel: Kostenreduzierung

## Kostenfaktor **Silicium**

- ⇒ Reduzierung der Waferdicke
- ⇒ Erhöhung des Wirkungsgrades

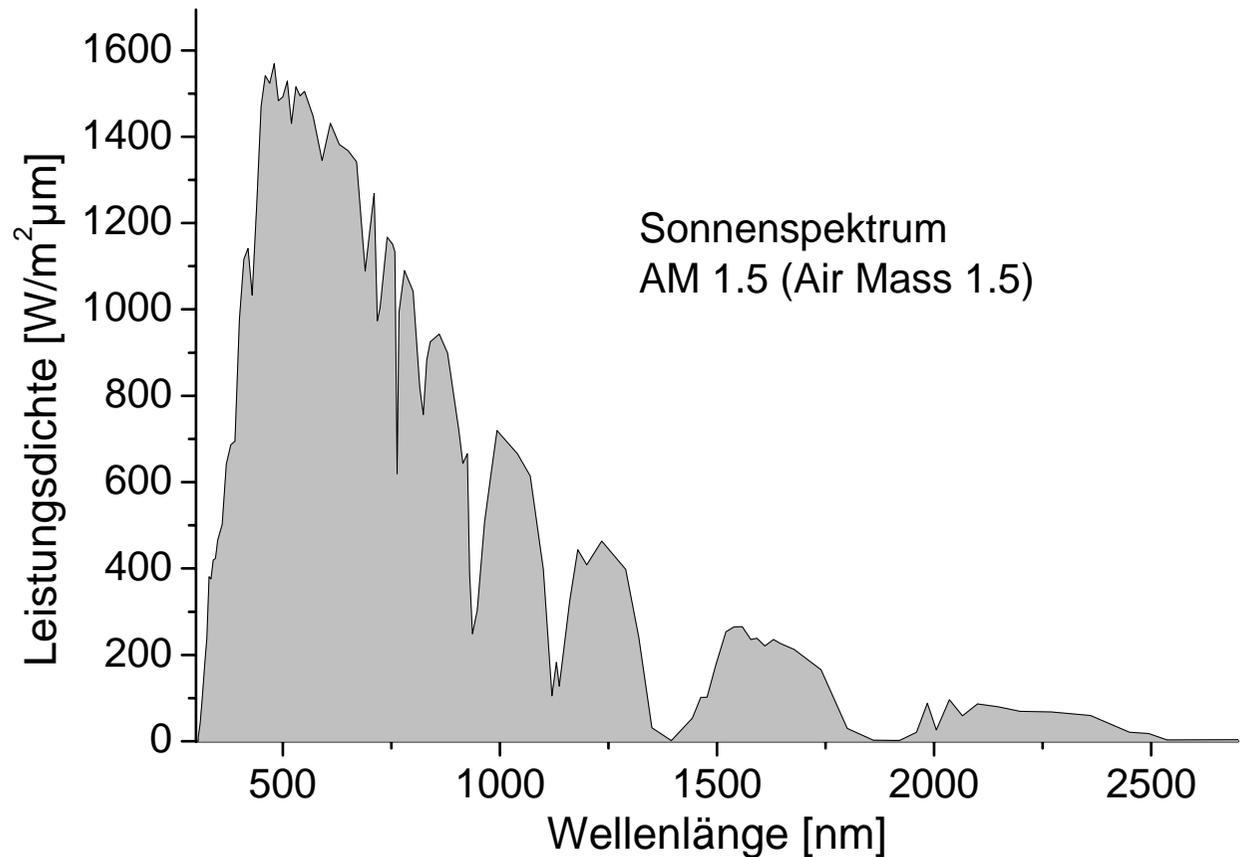
Industrie  $\eta = 14 - 16\%$

Labor  $\eta > 20\%$



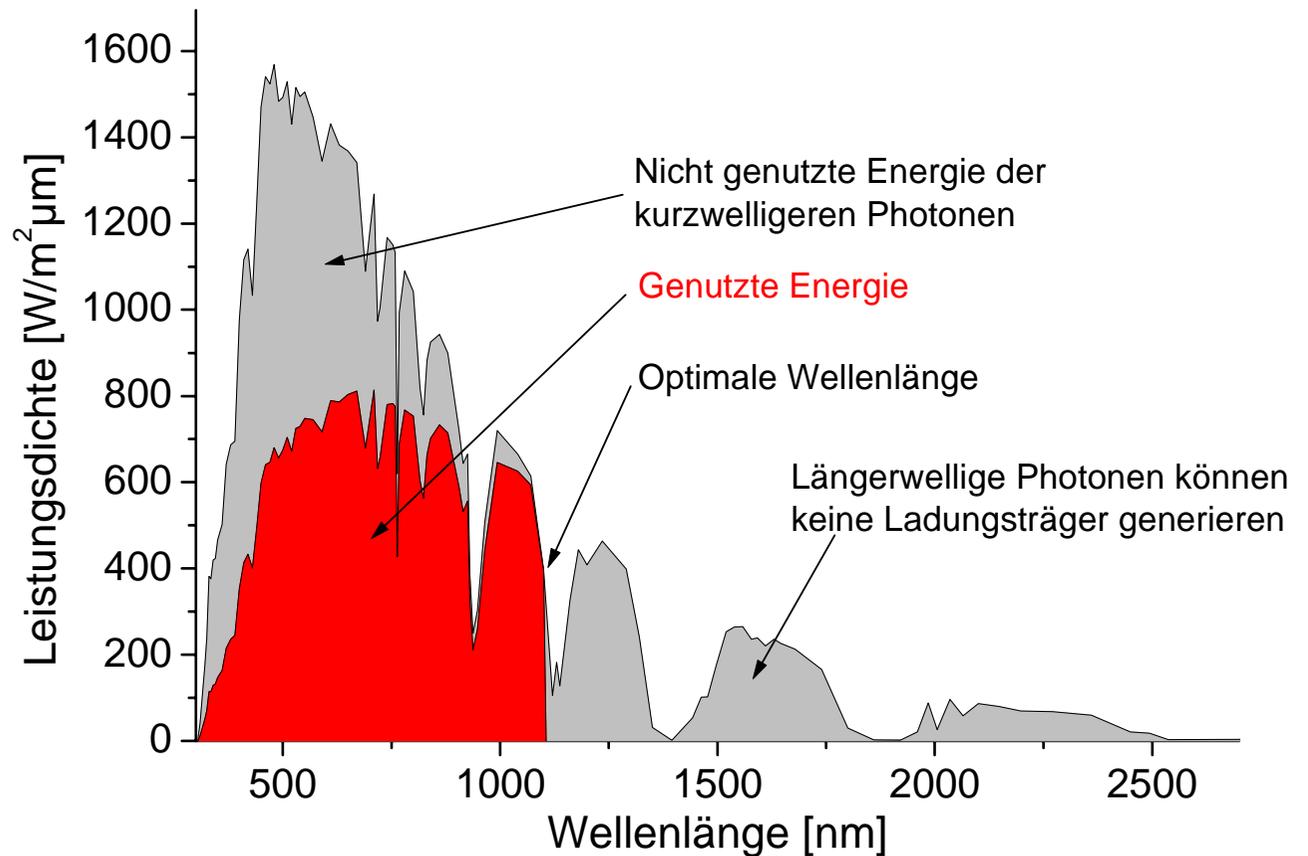
## Welchen Wirkungsgrad kann man überhaupt erreichen?

- Shockley, Queisser (1961):  
Grenze des Wirkungs-  
grades einer einfachen  
Solarzelle = 33% (AM1.5)

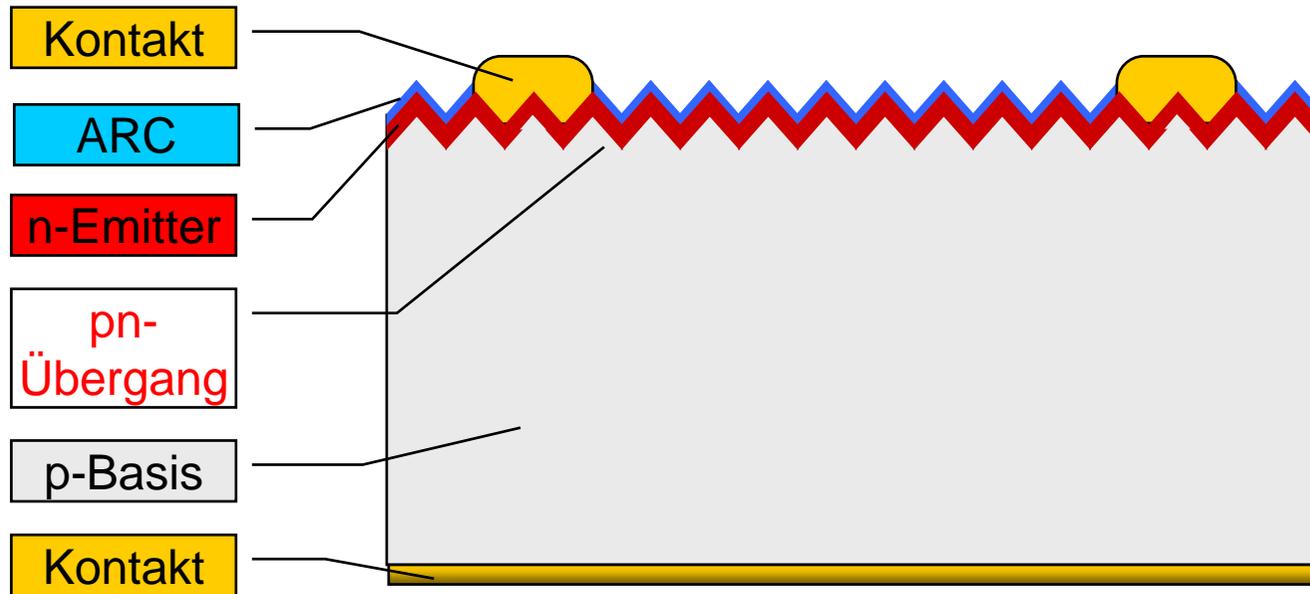


## Welchen Wirkungsgrad kann man überhaupt erreichen?

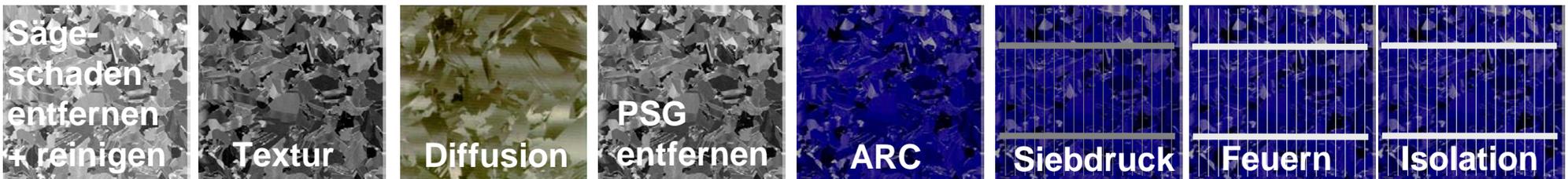
- Shockley, Queisser (1961):  
Grenze des Wirkungsgrades einer einfachen Solarzelle = 33% (AM1.5)
- Größter Verlust:  
Thermalisierung und Nichtabsorption
- Beste Siliciumzelle = 24.7%
- 75% des möglichen Wirkungsgrades!



# Zelltechnologie - Stand der Technik



## Herstellungsprozess



# Stand der Dinge: 300 $\mu\text{m}$ dicke Industriezelle

$\eta = 15.7\%$

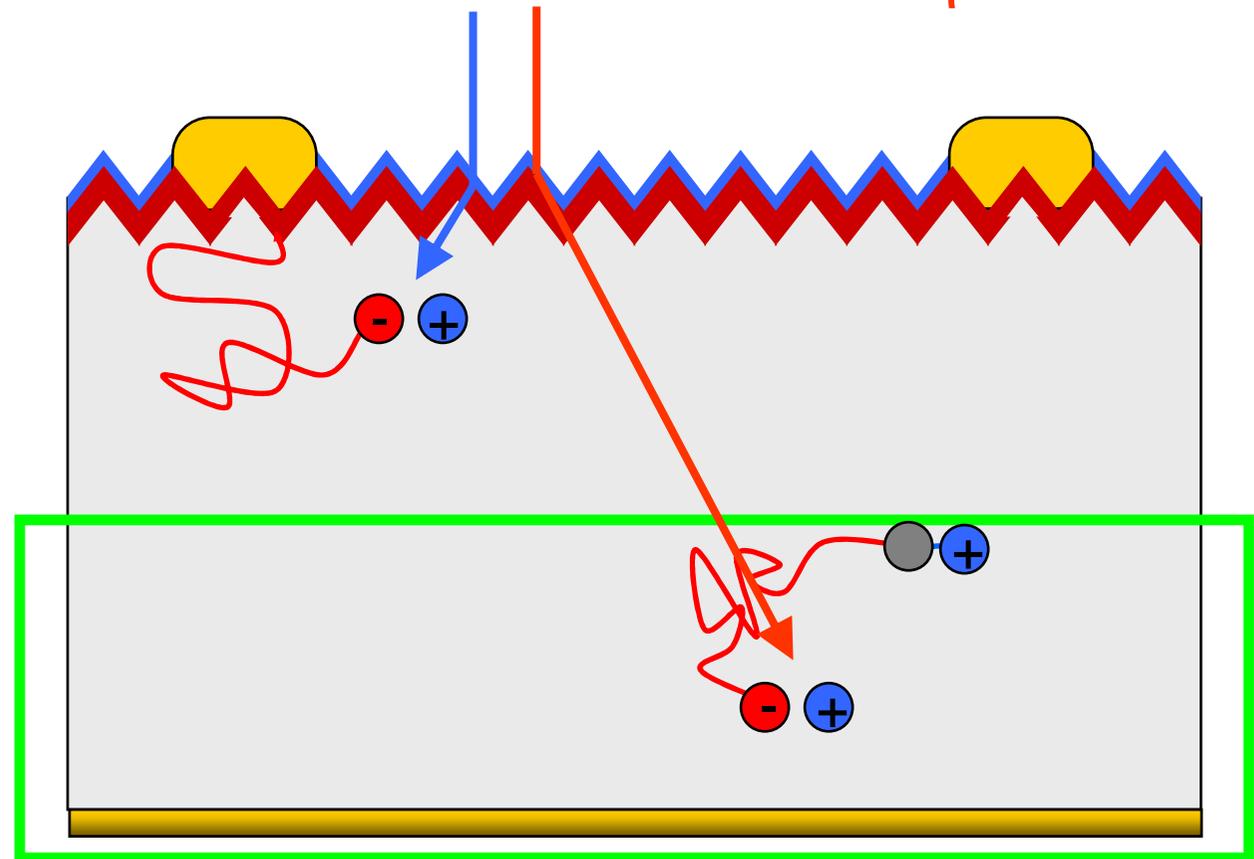
Problemzone 1:

Materialqualität zu gering

⇒ Diffusionslänge von Ladungsträgern, die tief in der Basis erzeugt werden, reicht nicht aus um den „rettenden“ pn-Übergang zu erreichen.

Lösung:

Zelle dünner machen

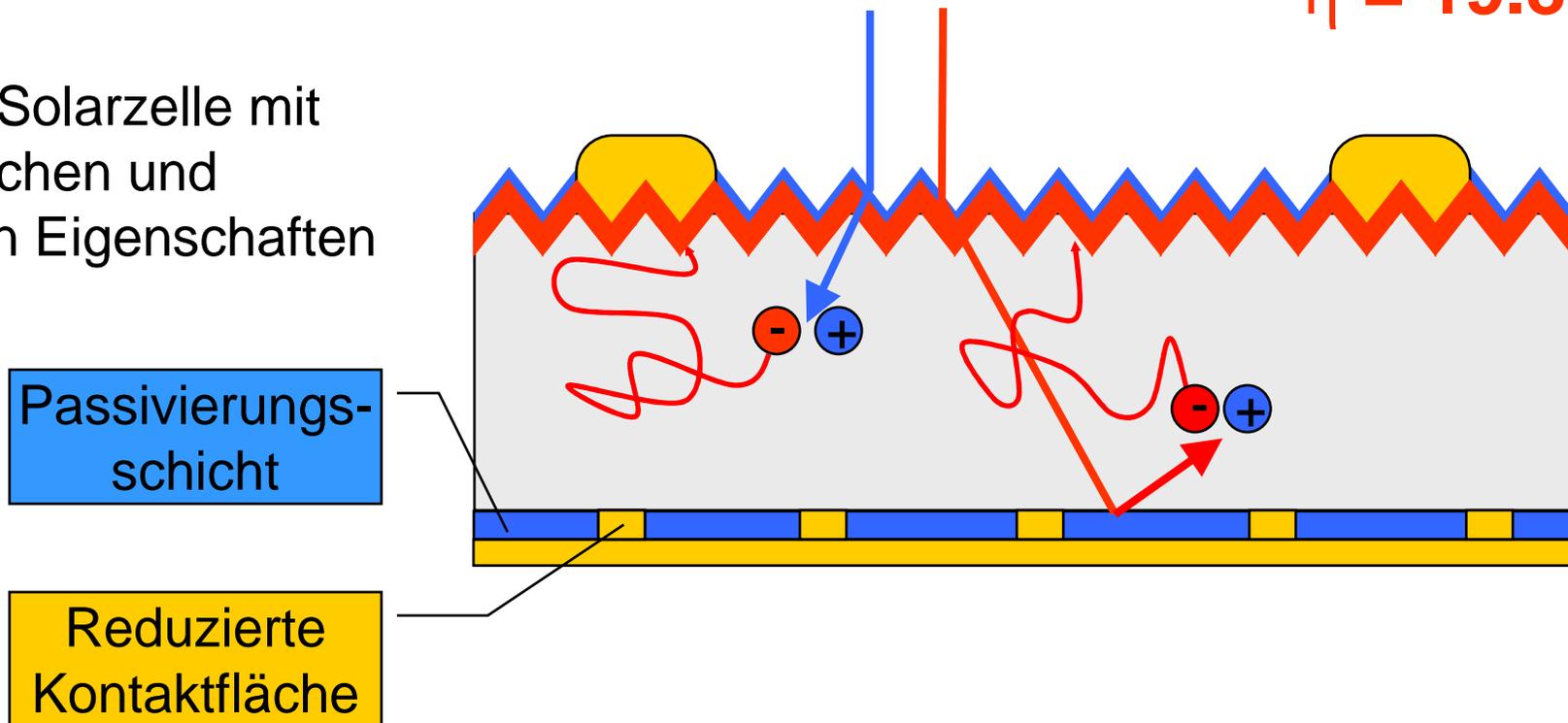




## Schritt II: Dünne Zelle mit optimierter Rückseite

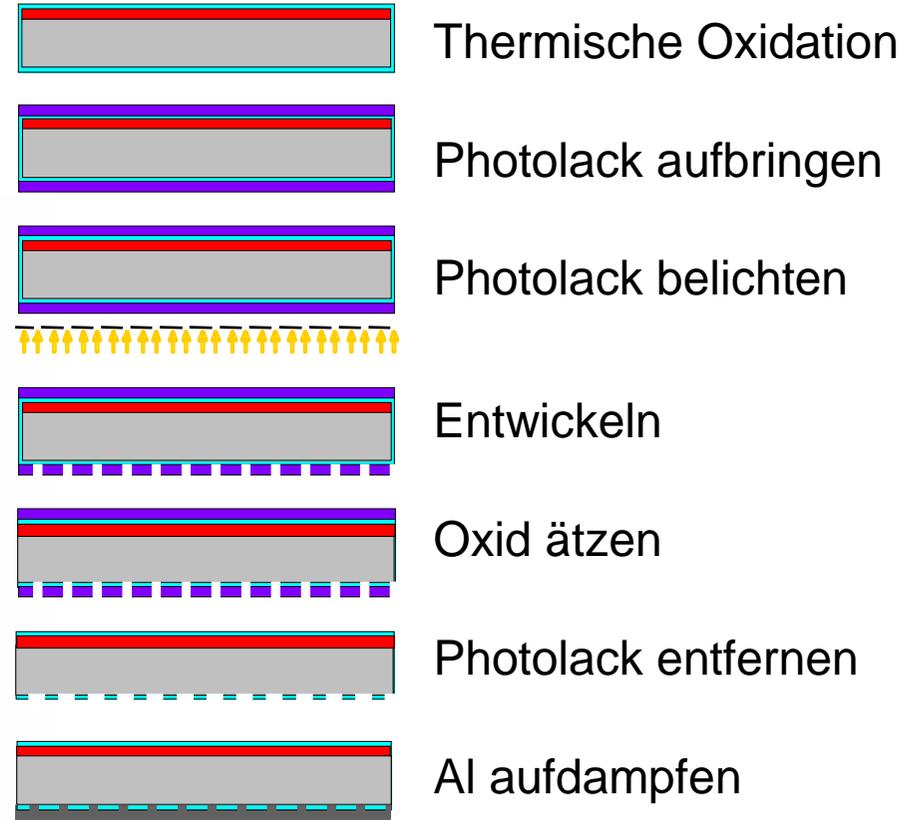
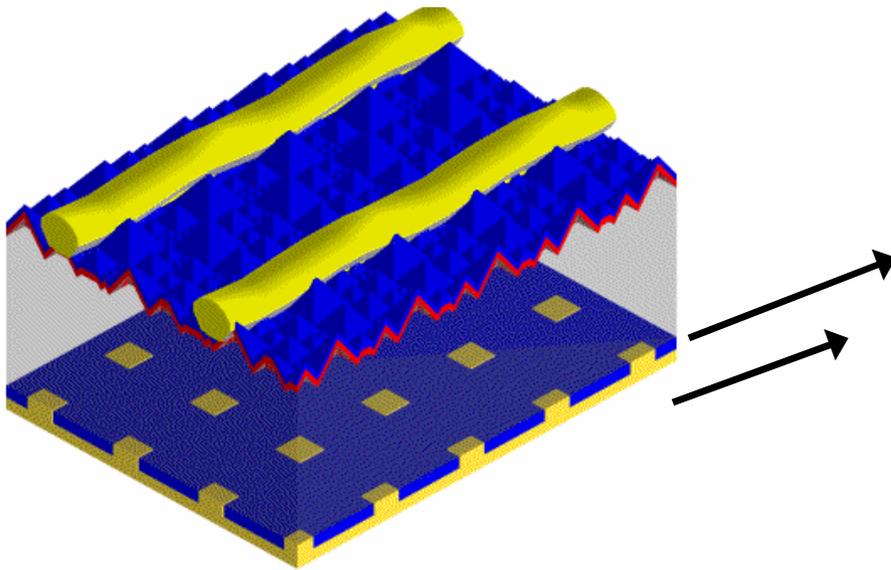
$\eta = 19.8 \%$

Optimierte Solarzelle mit guten optischen und elektrischen Eigenschaften



# Problem: Aufwendige Herstellung

Prozeßfolge im Labor:

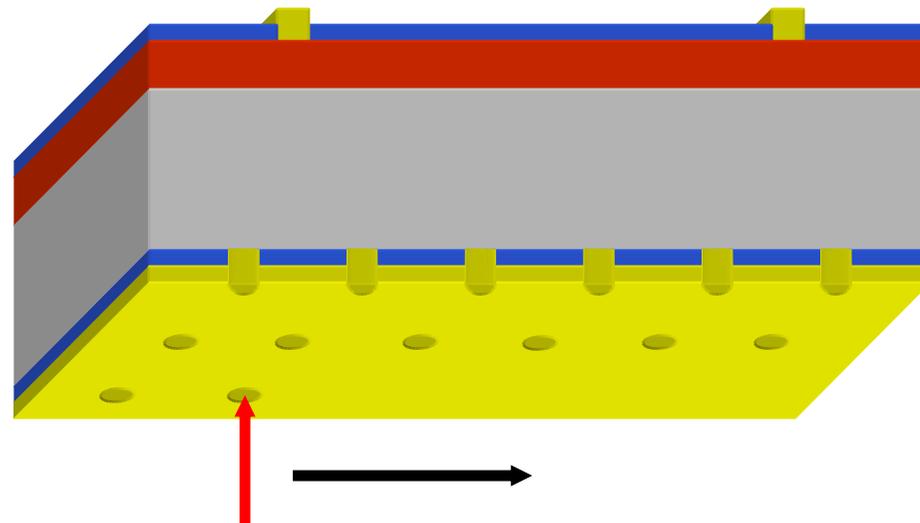


# Laser-Fired Contacts (LFC)

Wie man eine ideale Rückseite in drei Prozessschritten herstellen kann:

1. Passivierung ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiN}$ )
2. Metallisierung (Al)
3. Laserfeuern der Punktkontakte

Patent angemeldet

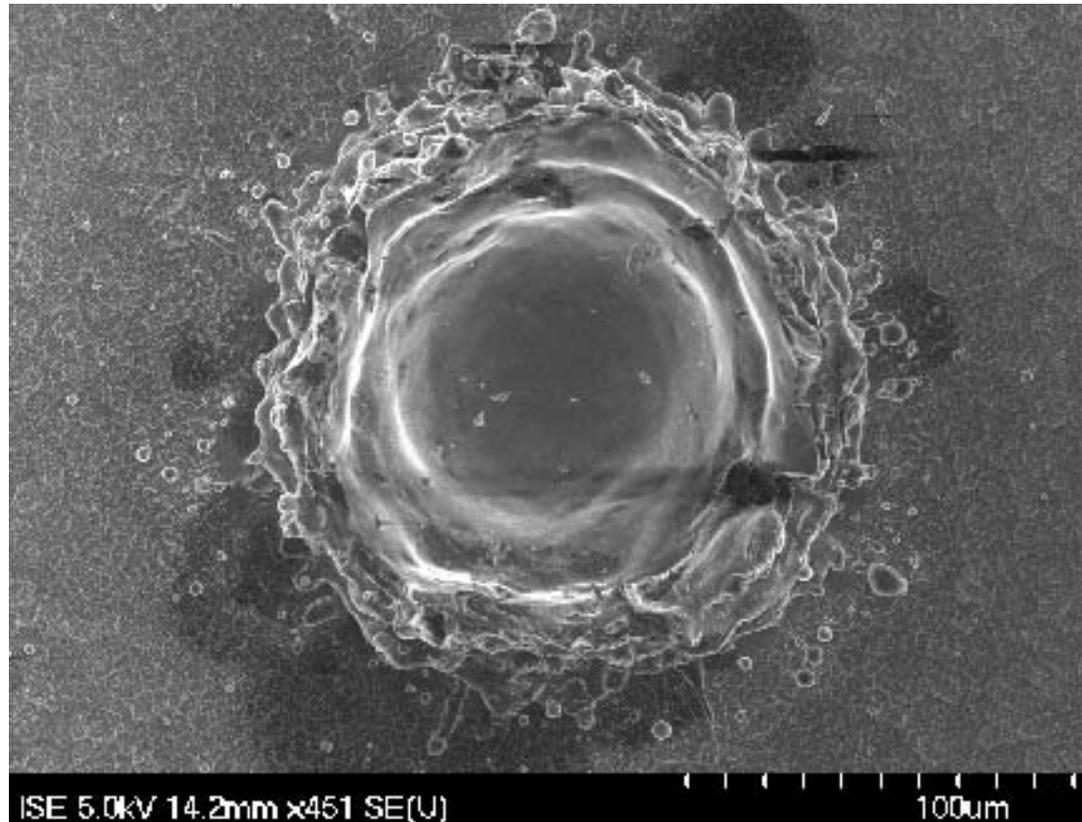


## Laser-Fired Contacts (LFC)

Bester Wirkungsgrad

21.5 %

Aber: *Schnell genug?*



REM-Aufnahme eines Laser-fired Contacts

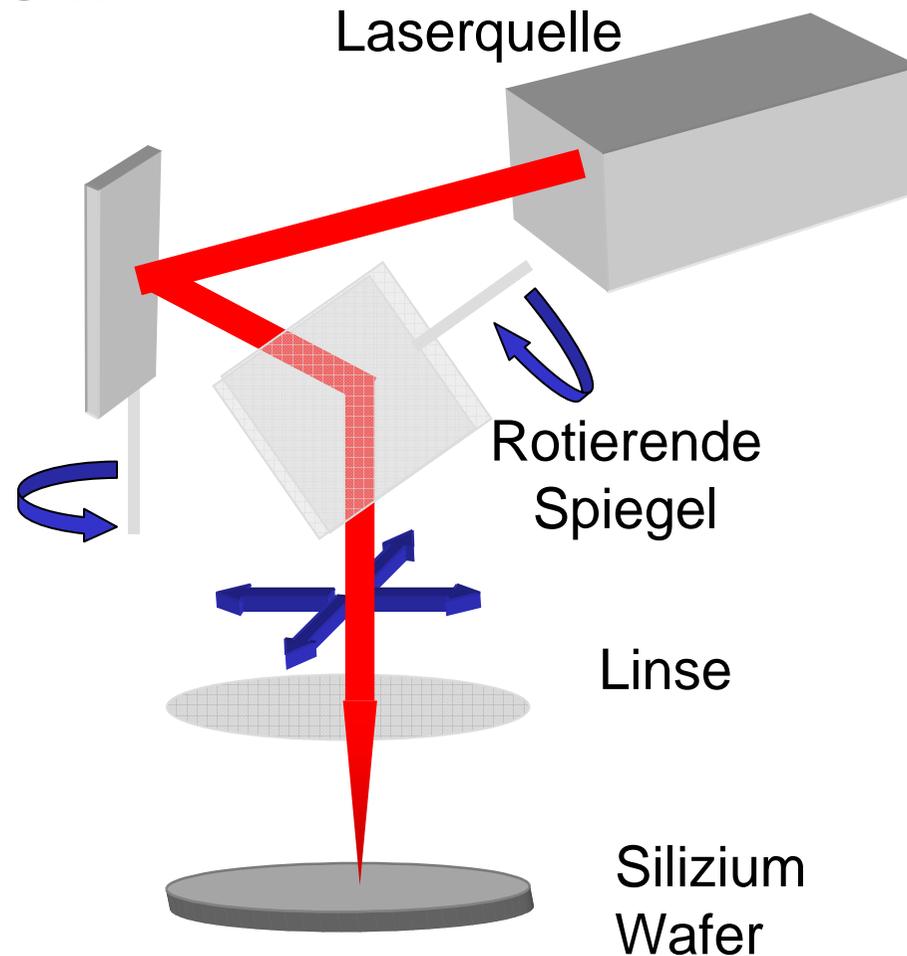


## LFC Pilotlinien-Lasersystem

Pilotliniensystem für LFC  
am Fraunhofer ISE

**Anforderung:**  
weniger als  
3 s pro Wafer

Automatisiertes  
Nd:YAG Lasersystem  
mit Scanner-Kopf



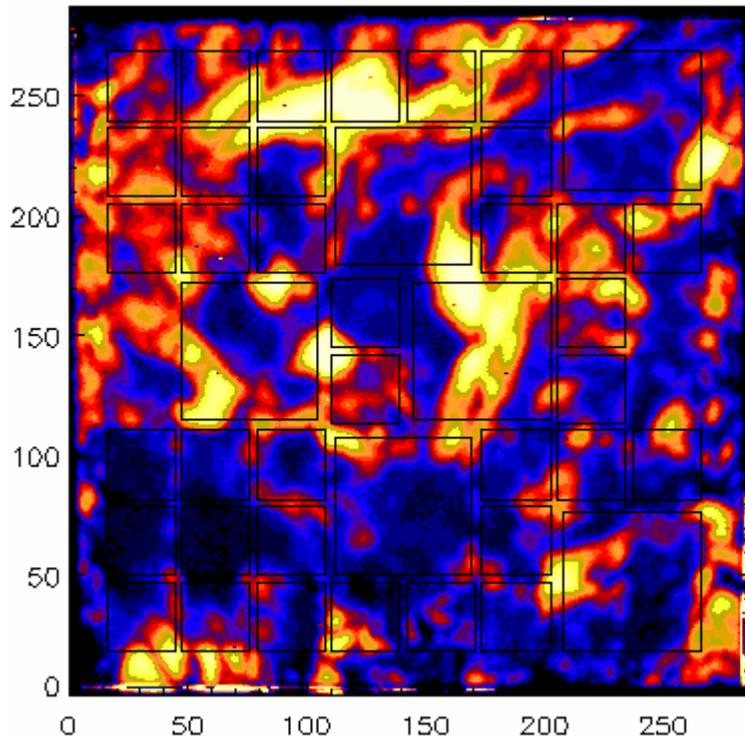
## Dünne und flexible Si-Solarzellen (LFC-Technologie)

- Wafer = 42  $\mu\text{m}$
- Wirkungsgrad = 20.2%

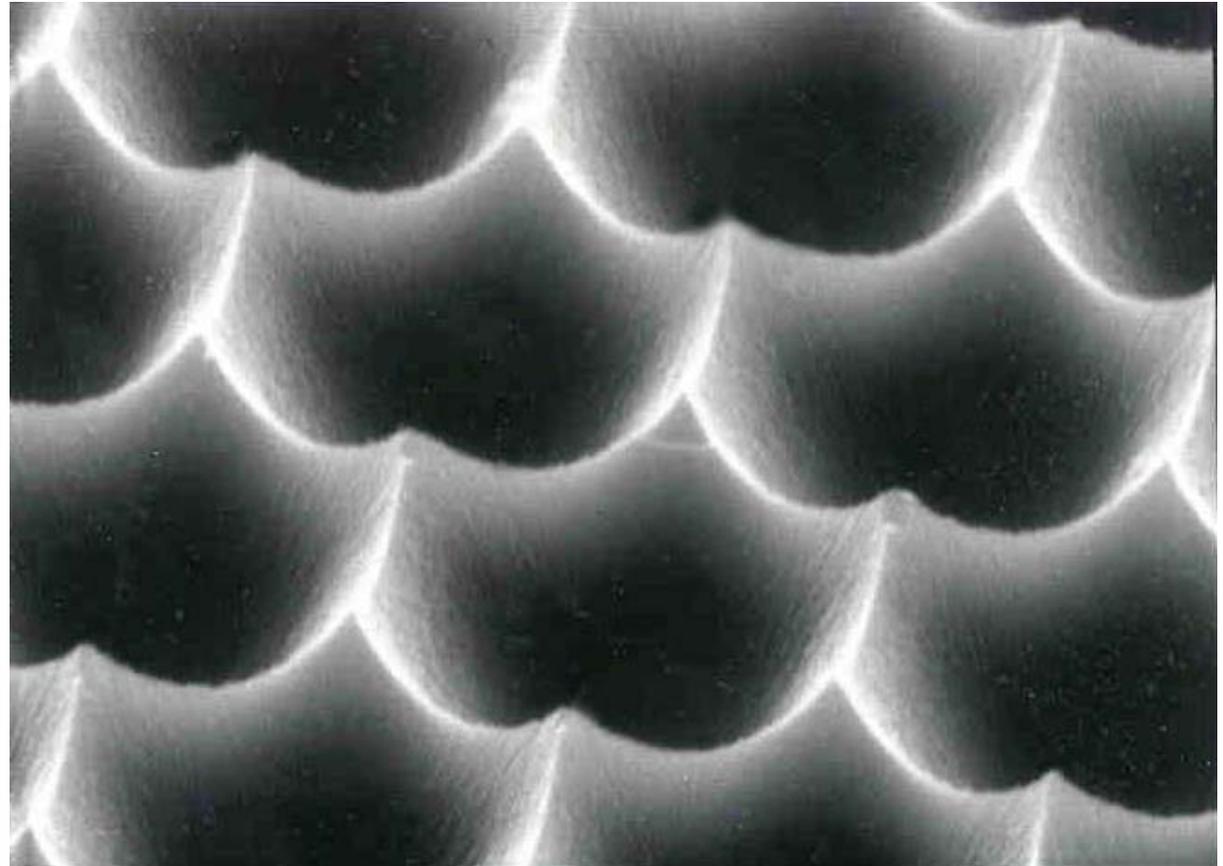


# Weltrekordzelle aus multikristallinem Silicium

- Wafer = 99  $\mu\text{m}$
- Wirkungsgrad = 20.3%



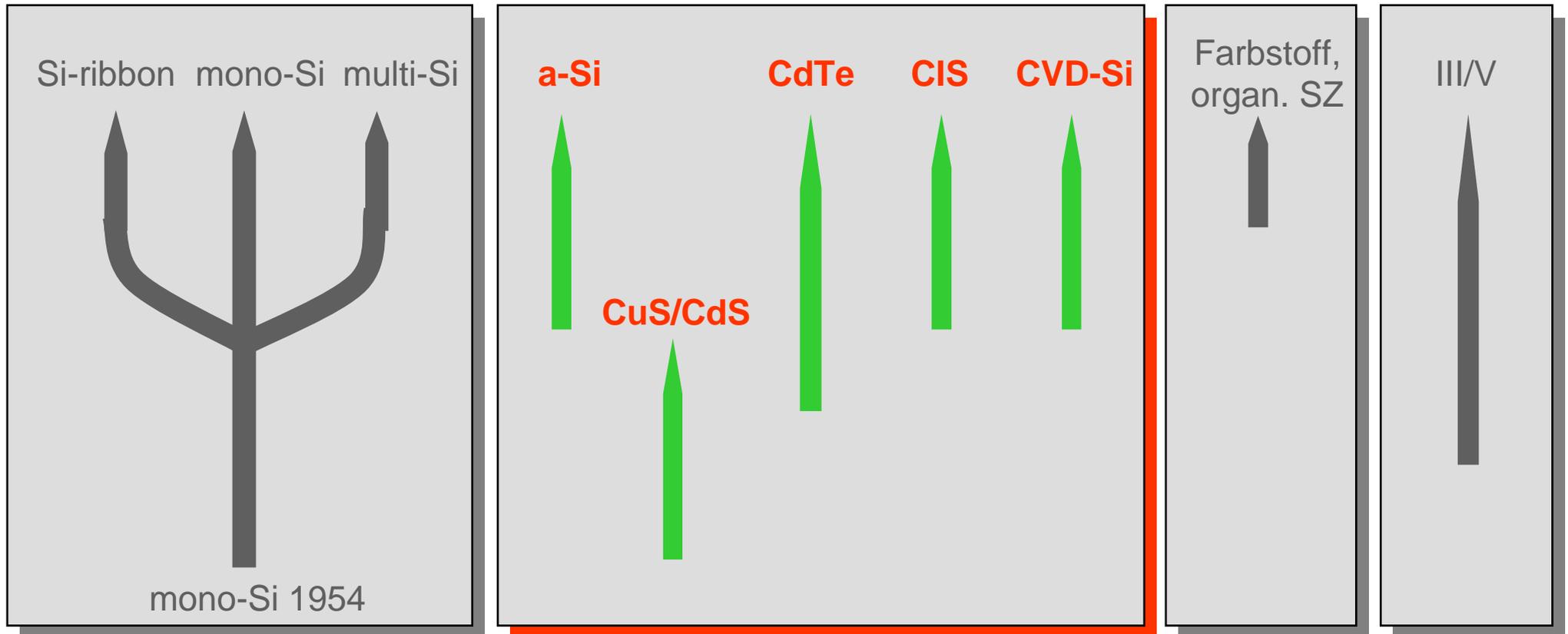
S. W. Glunz, DPG\_2005\_Glunz.ppt



Page 24

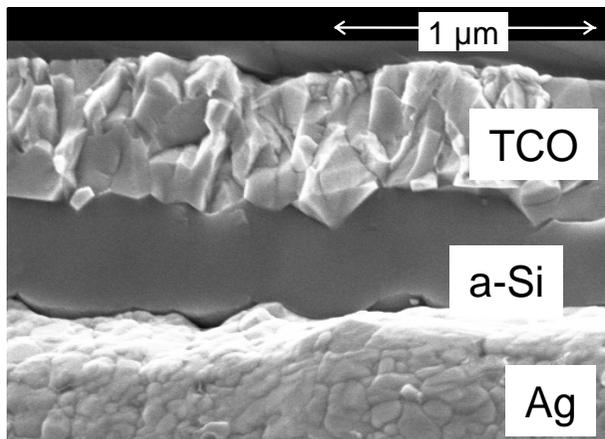


# Dünnschichtsolarzellen



# Dünnschichtsolarzellen: Amorphes Silizium

- Interessant für Gebäudeintegration
- Einfache Technologie, aber geringer Wirkungsgrad (5 %)



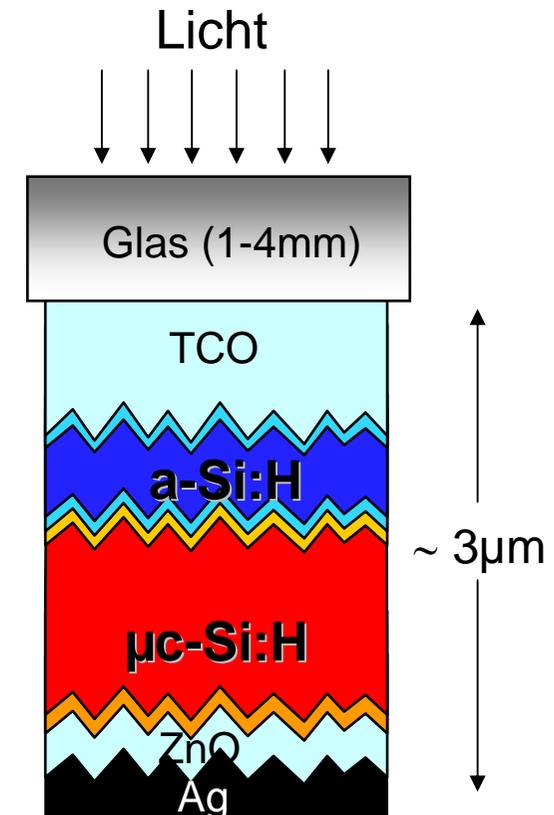
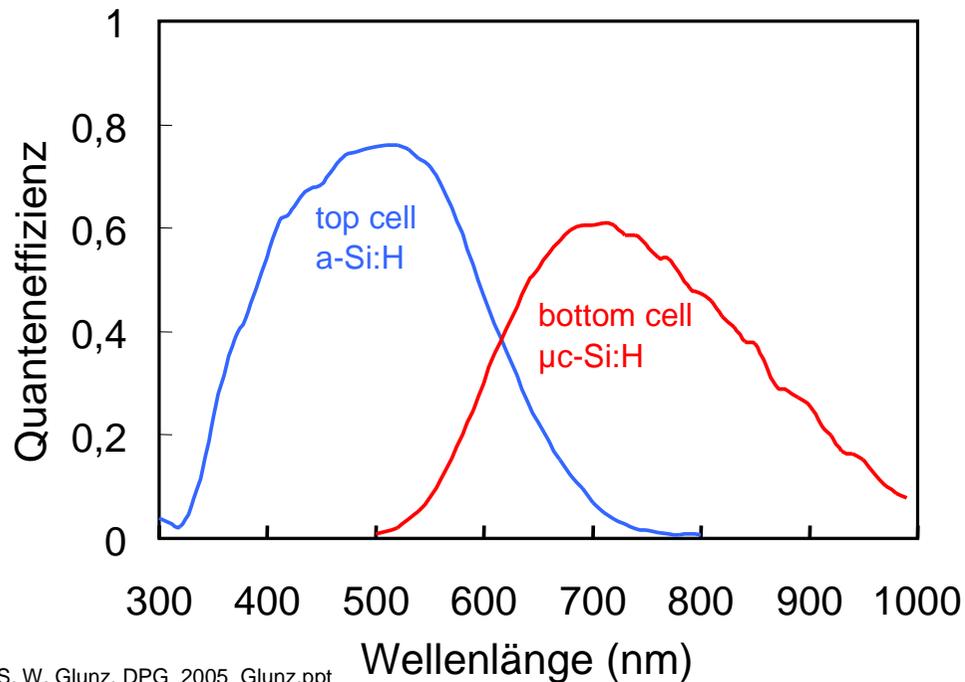
Quelle: Forschungszentrum Jülich



Gebäudeintegrierte a-Si Technik: Stillwell Avenue Terminal, New York  
ca. 5000 m<sup>2</sup>, Quelle: RWE SCHOTT Solar

# Dünnschichtsolarzellen: Amorphes + mikrokrist. Silicium

- Wirkungsgrade > 10%
- Keine Degradation
- Kaneka (Japan)



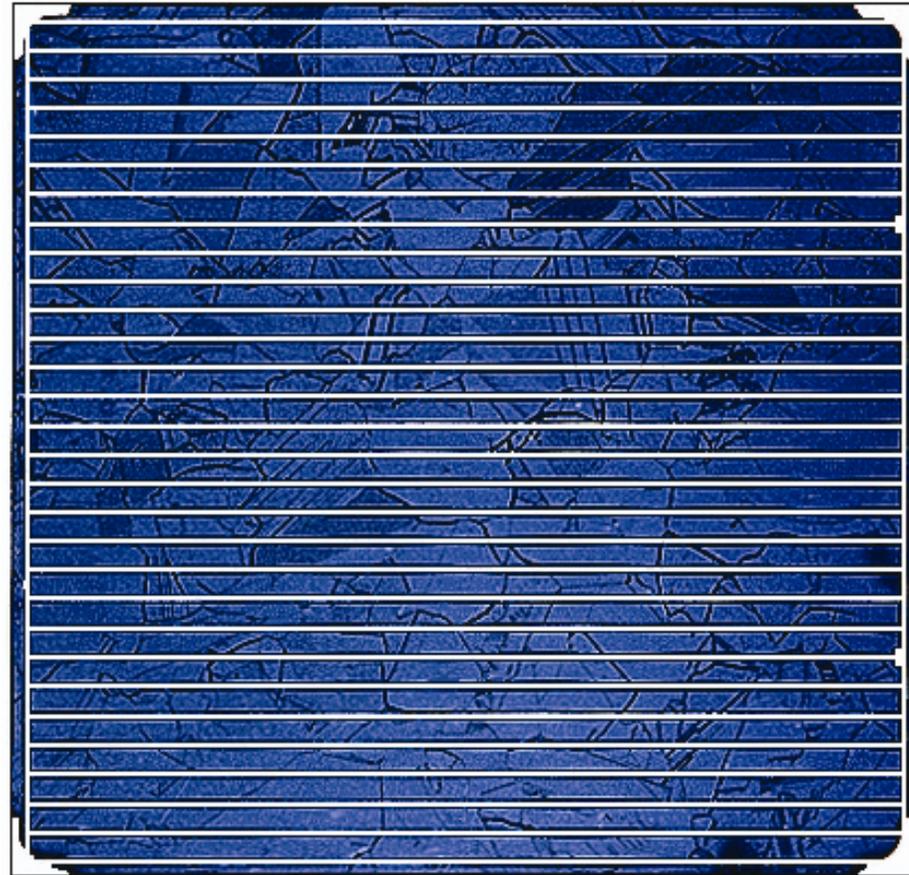
Quelle: Forschungszentrum Jülich



# Dünnschichtsolarzelle: Kristallines Silicium

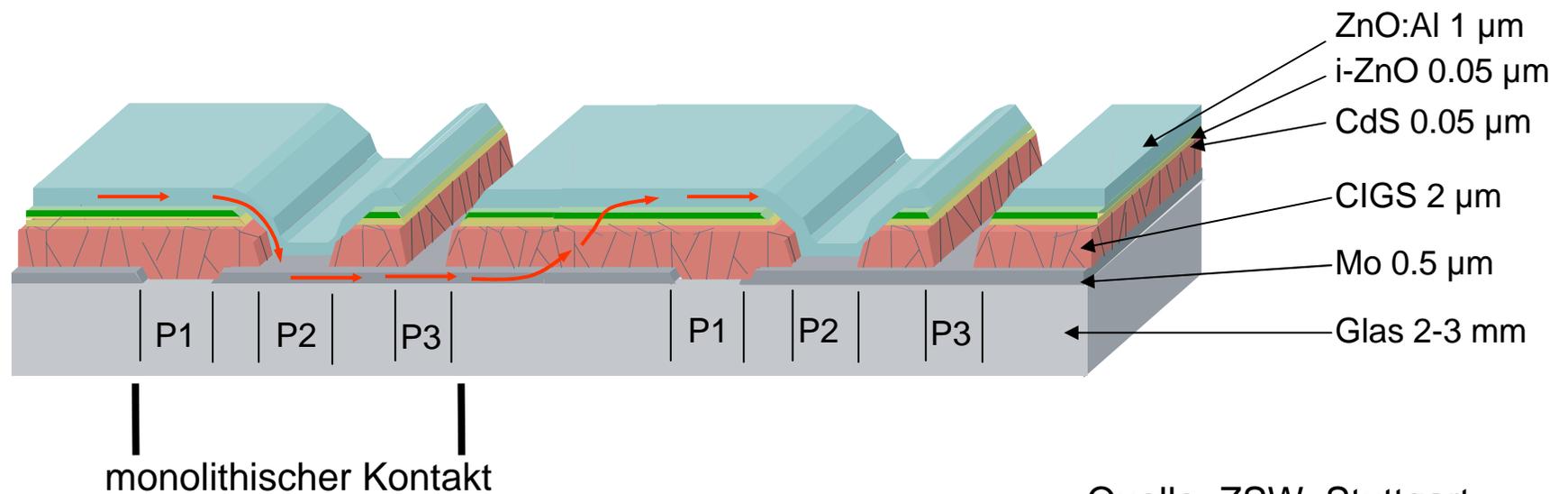
Hochtemperatur-  
beständiges Substrat

- Silicium ( $\eta = 17\%$ )
- Keramik ( $\eta = 10\%$ )



## Dünnschichtsolarzellen: CIS

- $\text{Cu(InGa)Se}_2$
- Hohe Laborwirkungsgrade (19%)
- Monolithische Serienschaltung



Quelle: ZSW, Stuttgart

# Dünnschichtsolarzellen: CIS

Serienfertigung

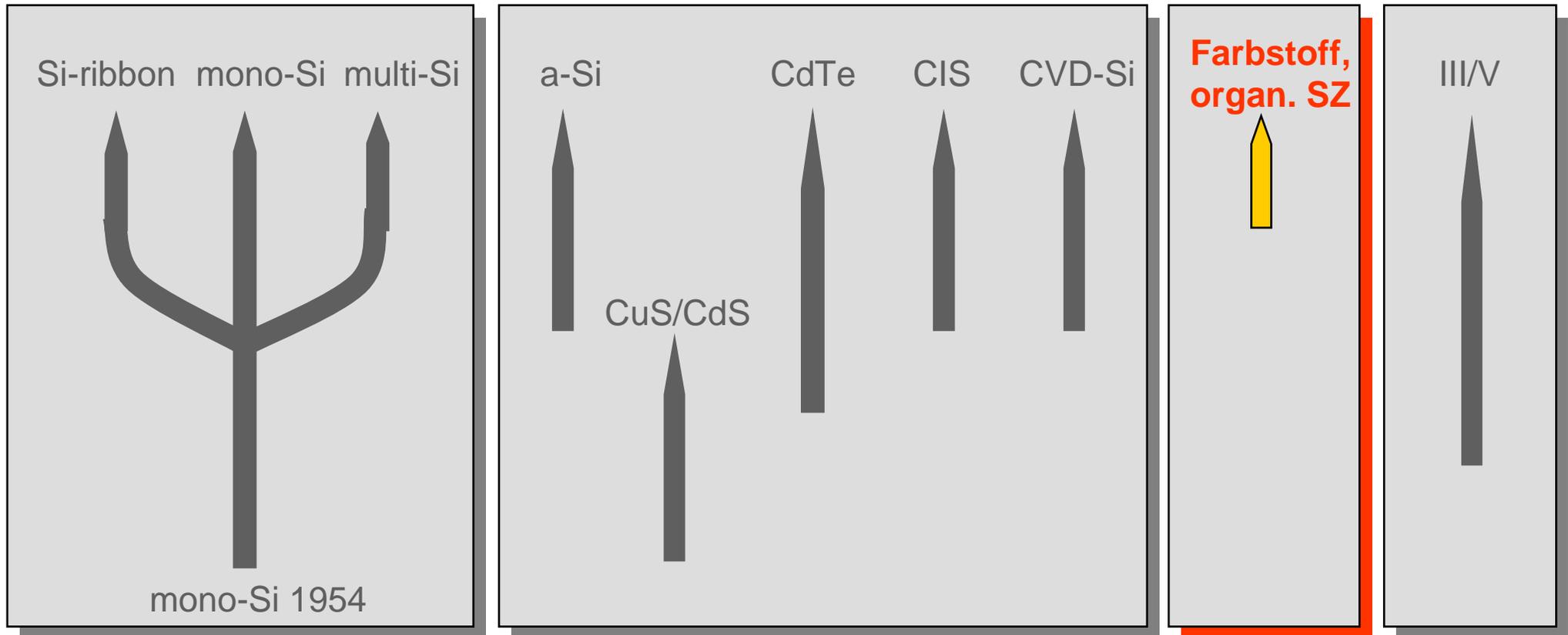


Quelle: Würth Solar

[S. W. Glunz, DPG\\_2005\\_Glunz.ppt](#)

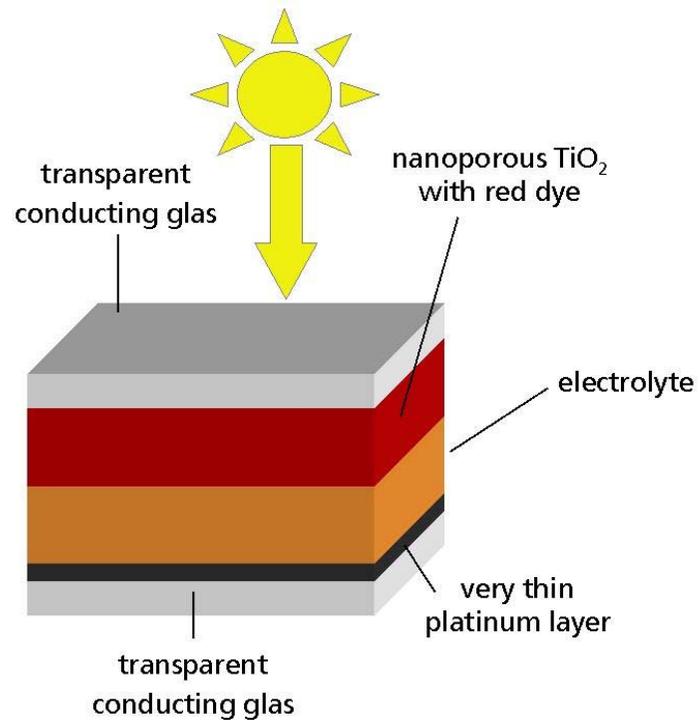


# Alternative Materialien



## Alternative Materialien: Farbstoffsolarzellen

- Wirkungsgrade bis 10%
- Neue Anwendungsfelder



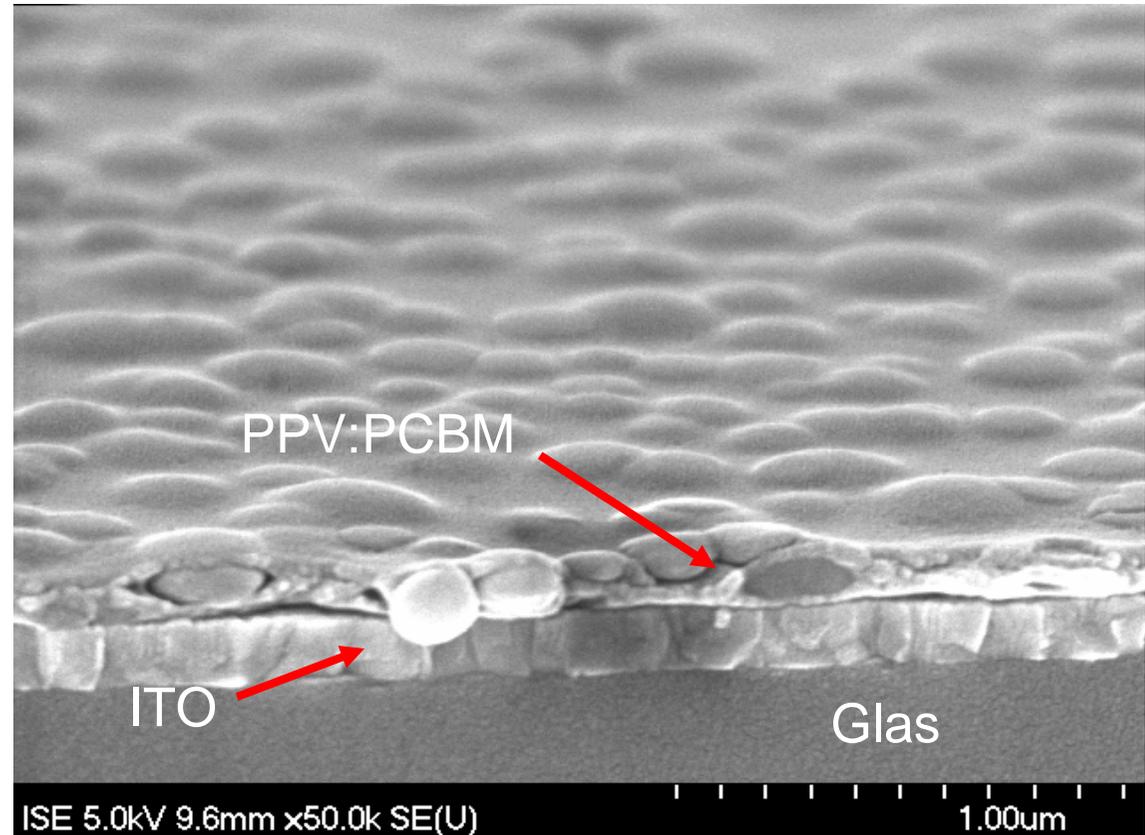
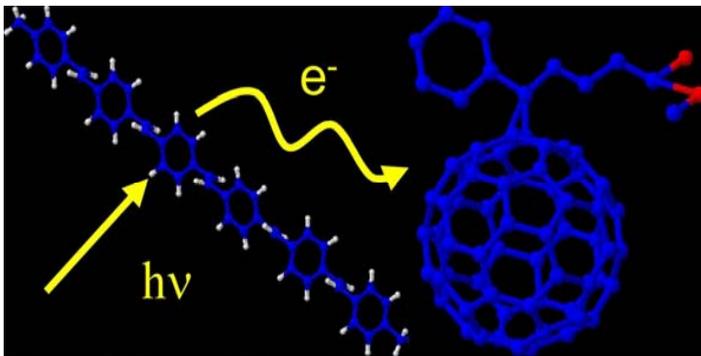
# Alternative Materialien: Organische Solarzellen

Wirkungsgrade bis 5%

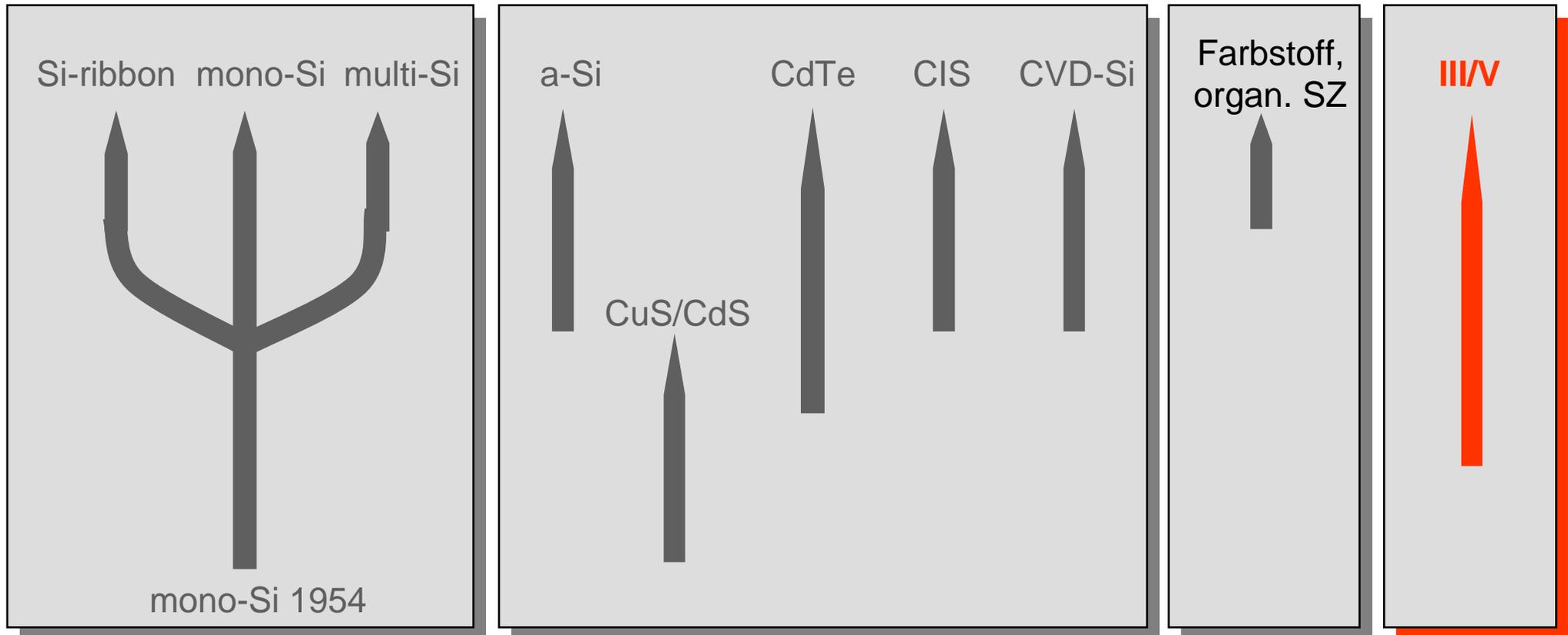
Polymerblend:

PCBM: C60-Molekül

PPV: Konjugiertes Polymer



# III-V Solarzellen und neue Konzepte

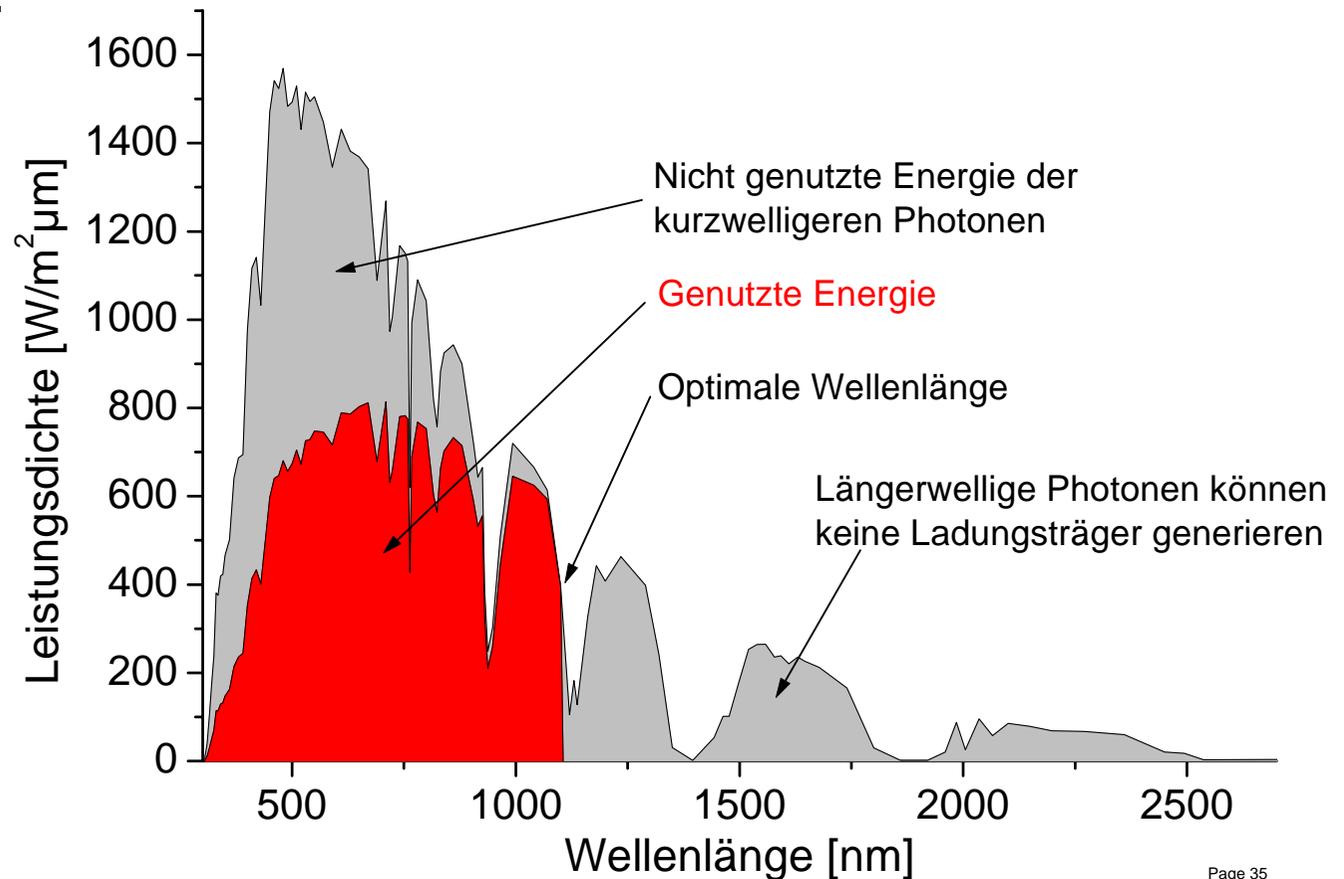


## Jenseits des Shockley-Queisser Limits

“Überwindung” des Shockley-Queisser-Limits (33%)

Spektral bedingte Verluste

- Thermalisierungsverluste
- Nichtabsorption



# Jenseits des Shockley-Queisser Limits

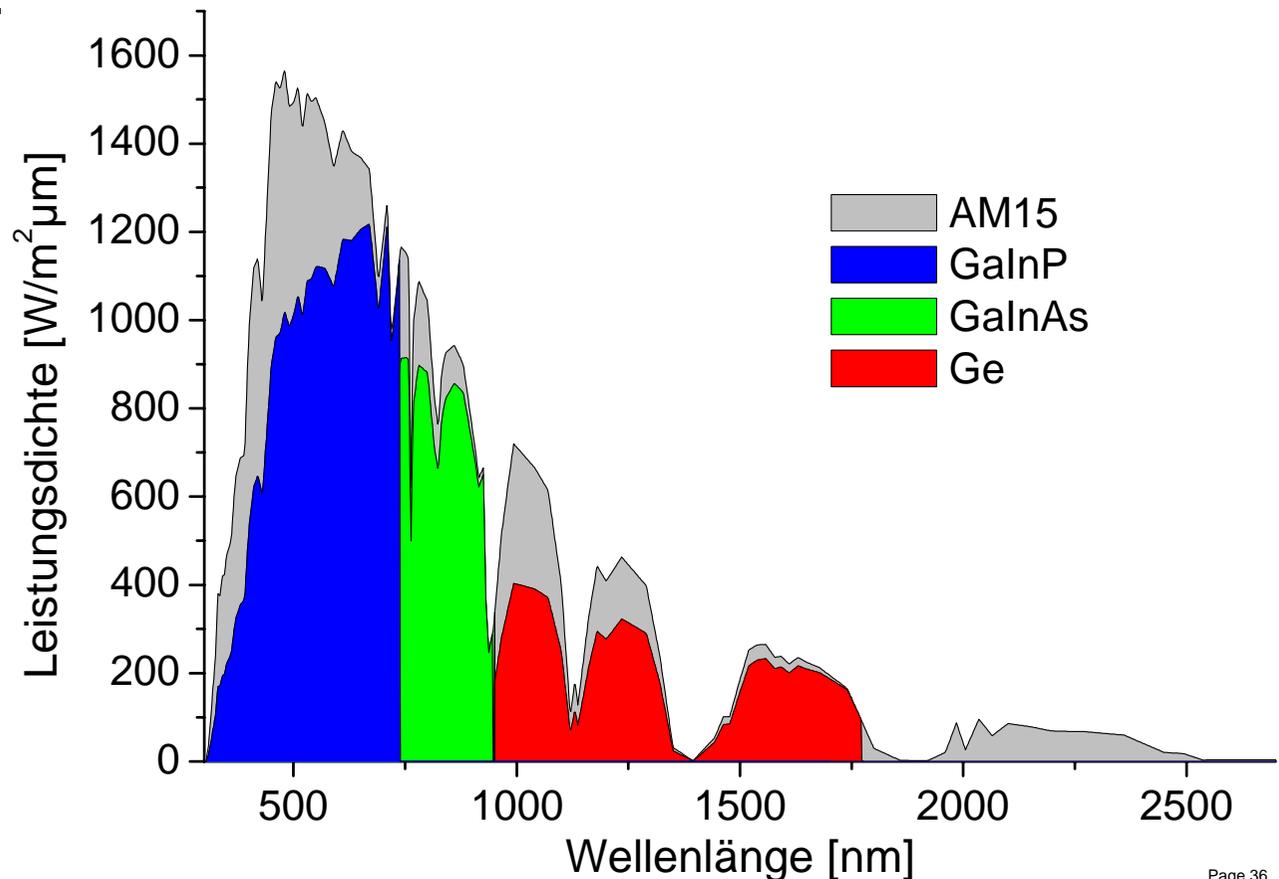
“Überwindung” des Shockley-Queisser-Limits (33%)

Spektral bedingte Verluste

- Thermalisierungsverluste
- Nichtabsorption

⇒ Tandemzellen      45.3%  
Tripelzellen        51.2%  
Quadrupelzellen   54.9%

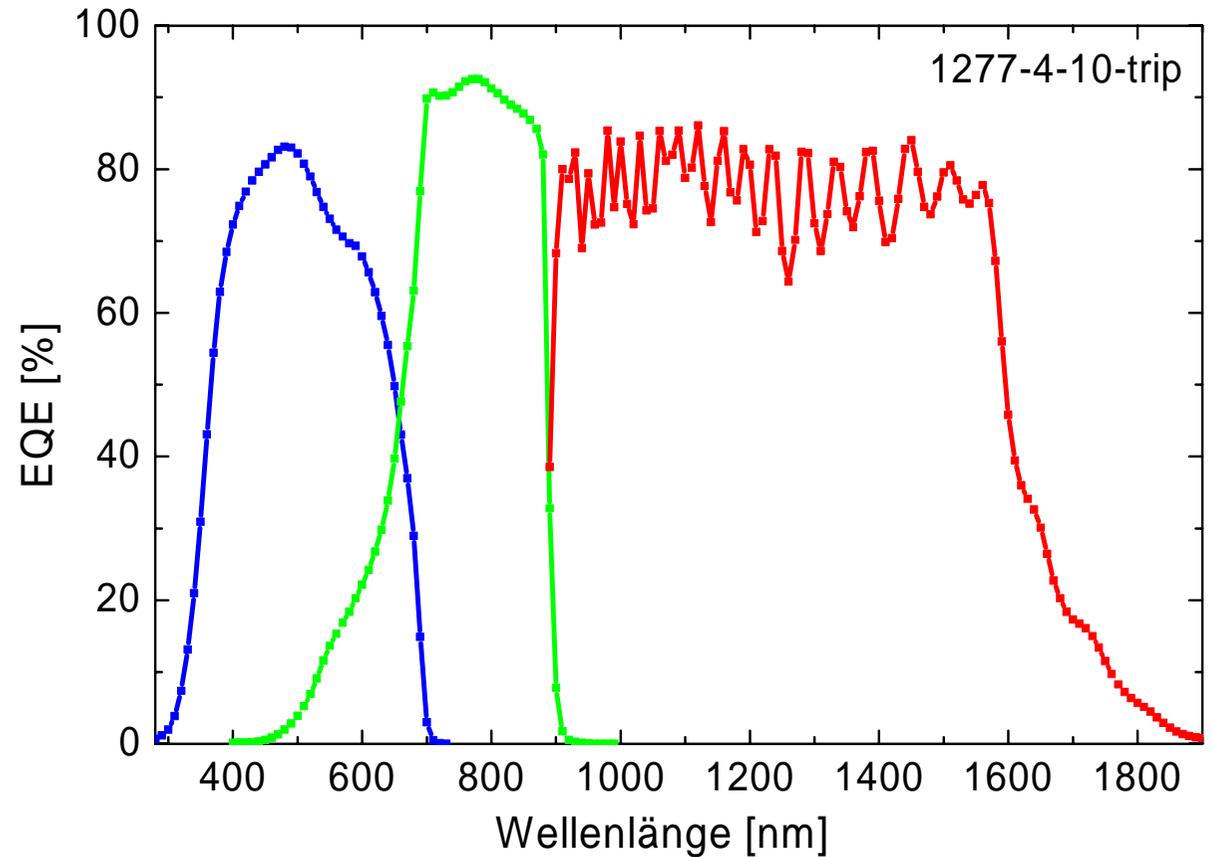
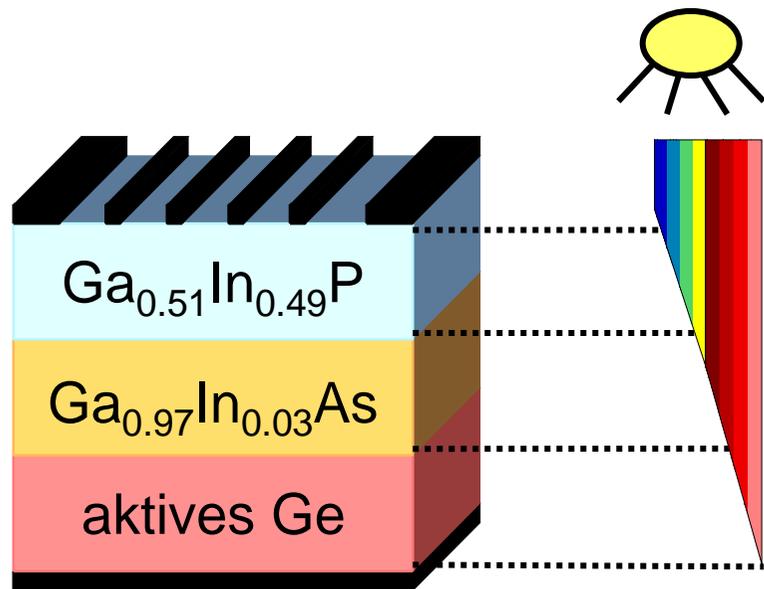
...



# Tripelsolarzellen aus III-V Halbleitern

Hohe Wirkungsgrade > 30%

Beste Tripelzelle 36.9%



# Herstellung von Tandem- und Tripelzellen

MOVPE-Technologie



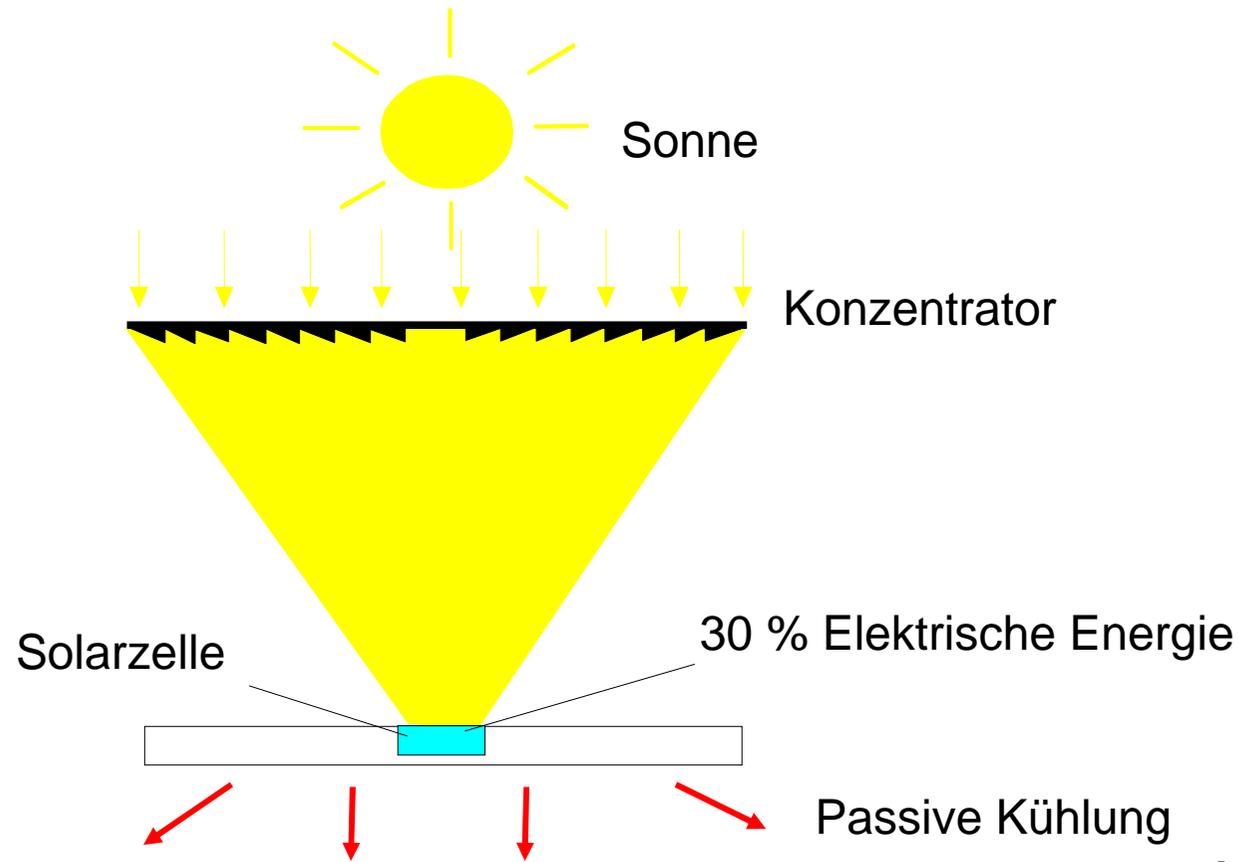
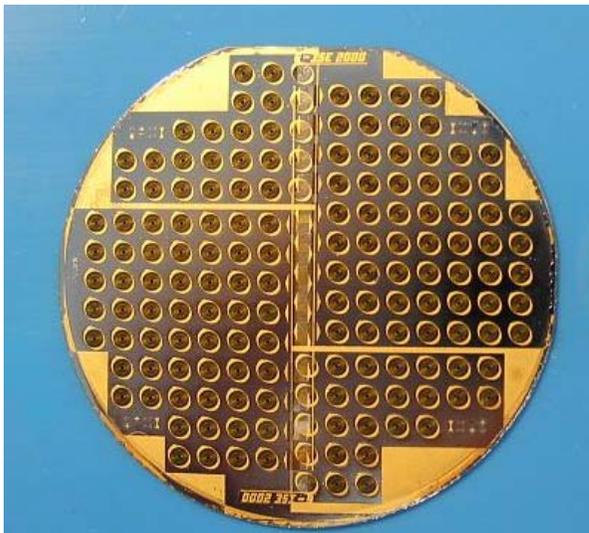
**AIX 2600 G3**



**8x4 Zoll Substrate pro Epitaxie**

# Konzentratorsolarzellen

Ersetze teuren Halbleiter durch billige Optik!



## Konzentratorkraftwerke

Hohe  
Modulwirkungs-  
grade (22.7 %)



Quelle: Fraunhofer ISE



Quelle: Amonix, USA



## Zusammenfassung

- Die Photovoltaik ist den Kinderschuhen entwachsen und ein ernstzunehmender Industriezweig
- Sehr hohe Wachstumsraten (stetig!)
- Trotz momentan sehr kleinem Beitrag zum Energiemarkt ist sie die regenerative Energieform mit dem größten Potential
- Obwohl Silizium auch in den nächsten Dekaden den größten Marktanteil ausmachen wird, gibt es viele interessante Optionen für die mittlere und ferne Zukunft.
- Deutschland ist einer der wichtigsten Technologie- und Wissensstandorte.