
Stand und Perspektiven der Photovoltaik für die Stromerzeugung

S.W. Glunz

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

Frühjahrssitzung des AKE, April 2004

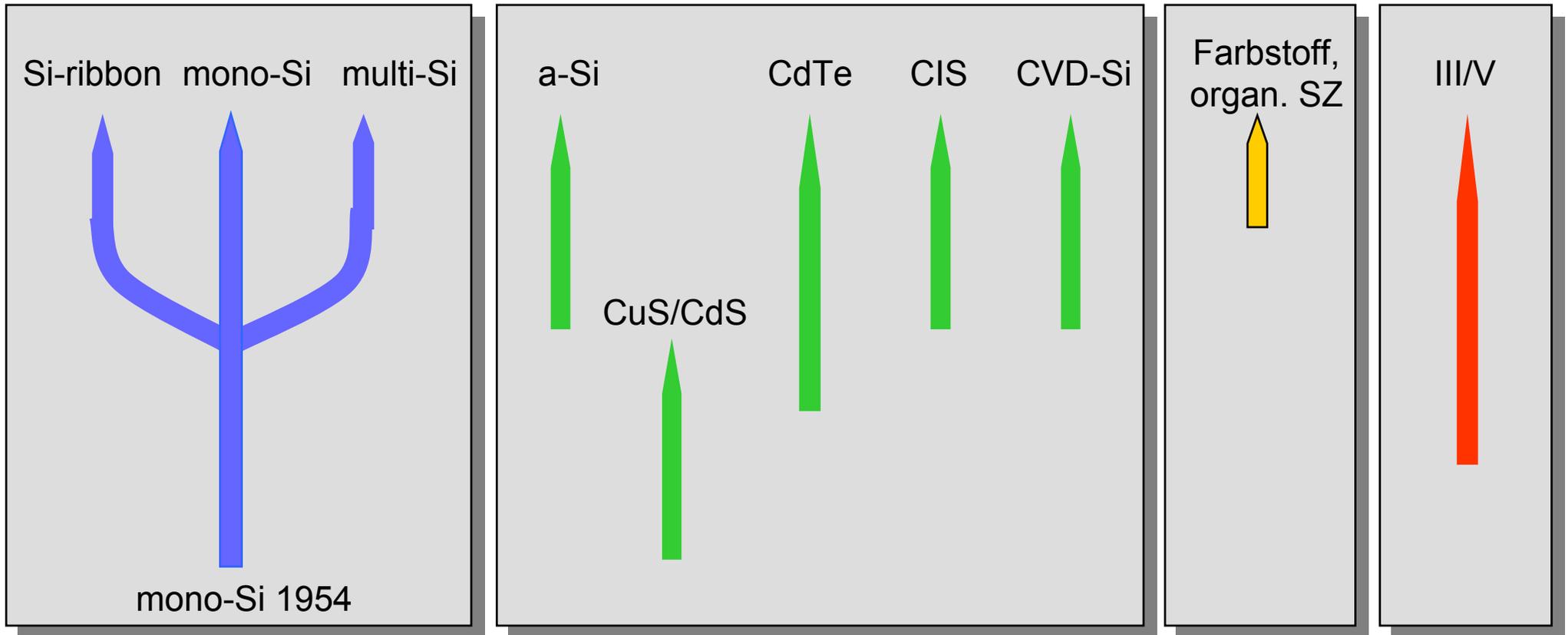
Übersicht



- *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

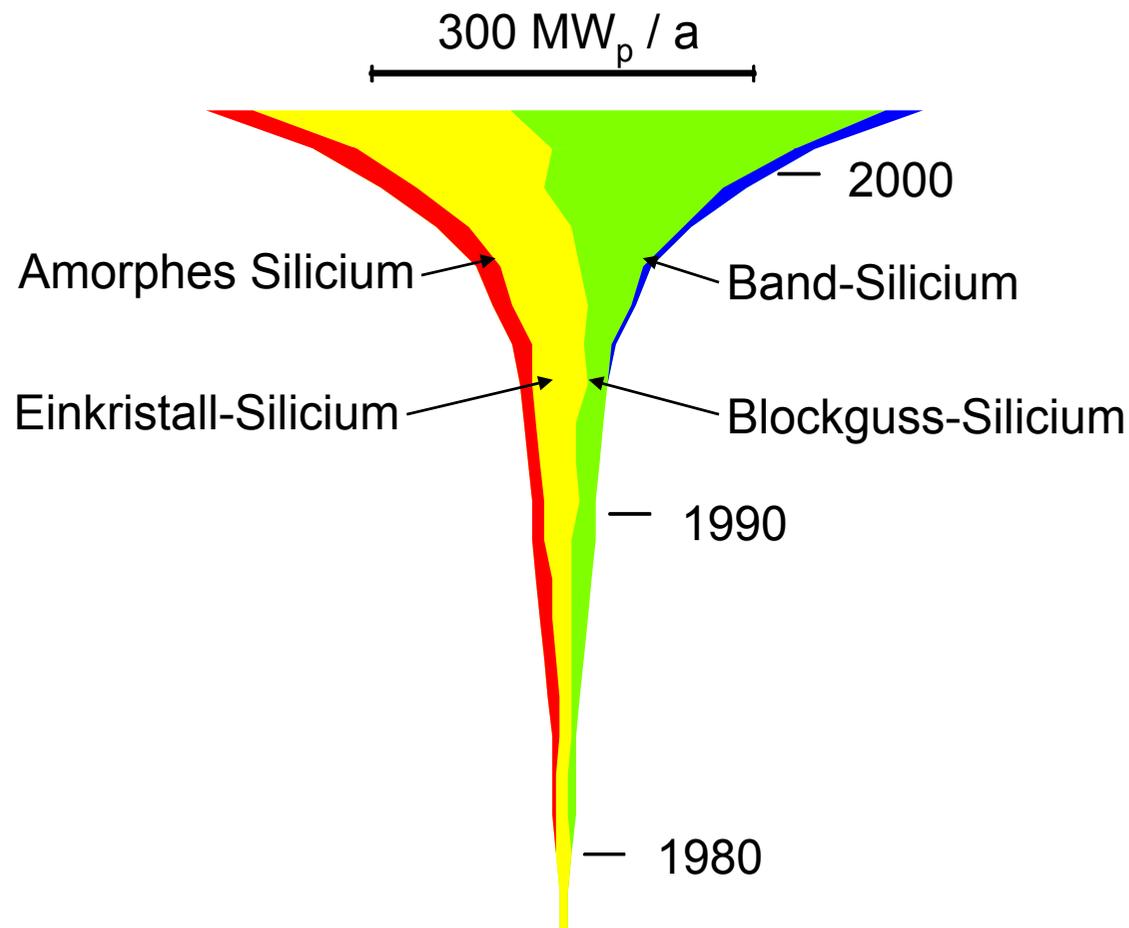
Evolution photovoltaischer Technologien,

Beispiele



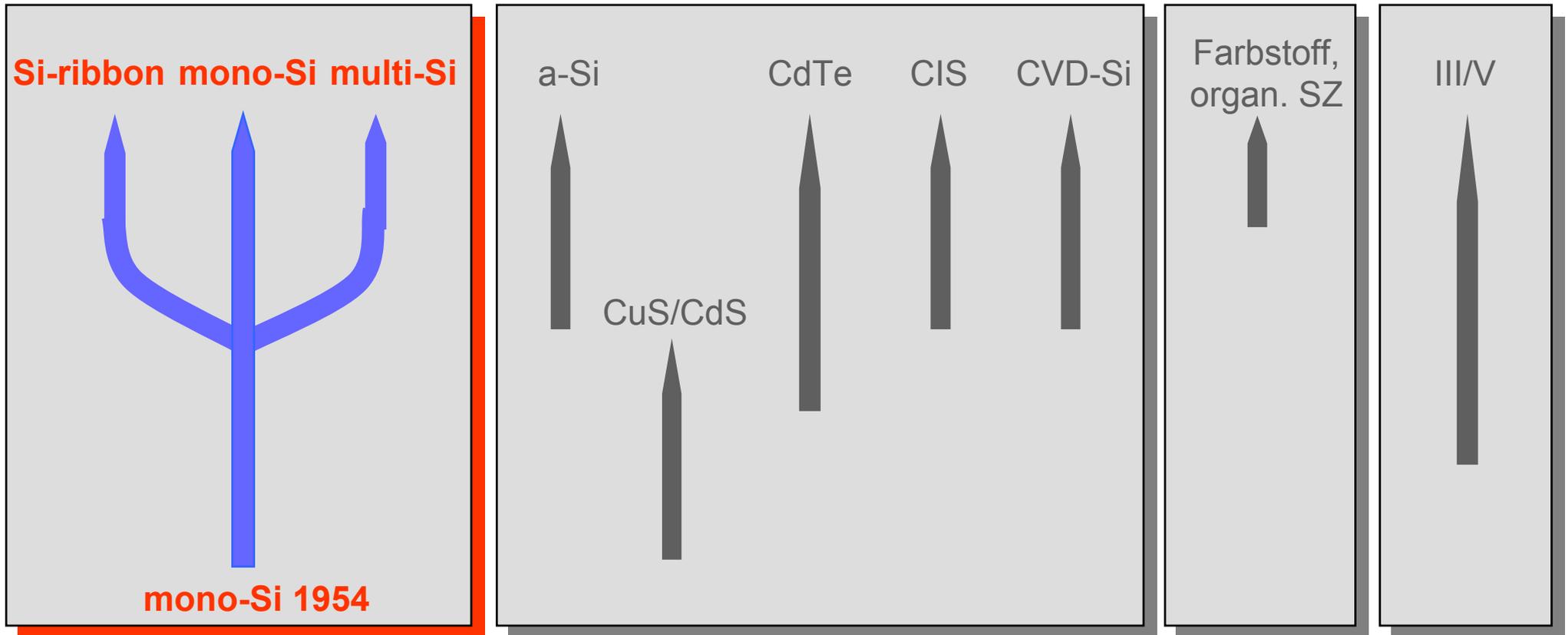
Marktentwicklung

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

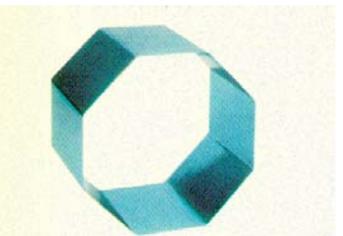


Quelle: G. Willeke, Fraunhofer ISE

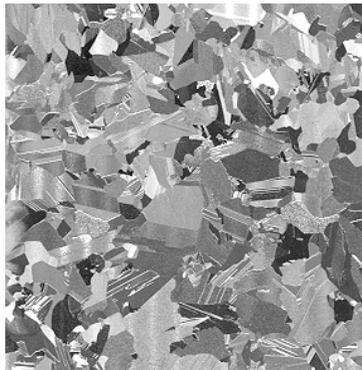
Solarzellen aus Siliciumwafern



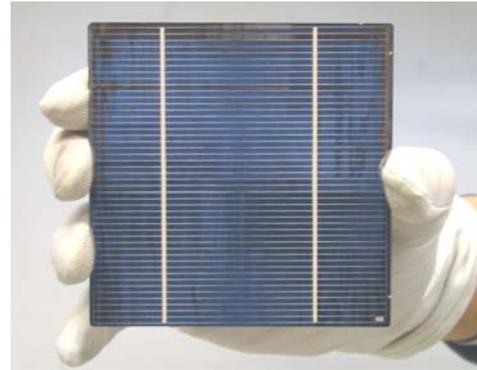
Siliciumsolarzellen: Herstellungsprozess



Silizium



Wafer
(Scheibe)



Solarzelle



Modul

Energy Payback

NELT = Net Energy Life Time

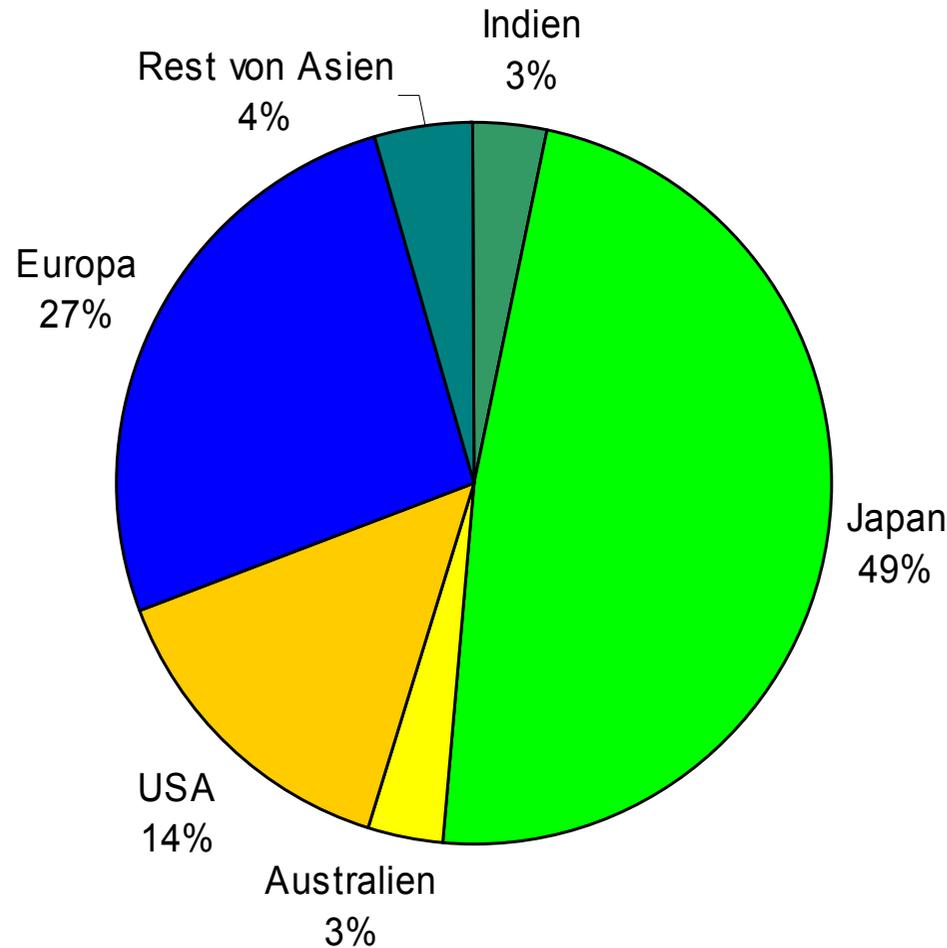
$$\begin{array}{rcl} 25 \text{ Jahre} & & (\text{Lebensdauer des Systems}) \\ - 3 \text{ Jahre} & & (\text{Energy Payback Time, mc-Si in unseren Breitengraden}) \\ \hline = 22 \text{ Jahre} & & (\text{NELT}) \end{array}$$

⇒ 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!

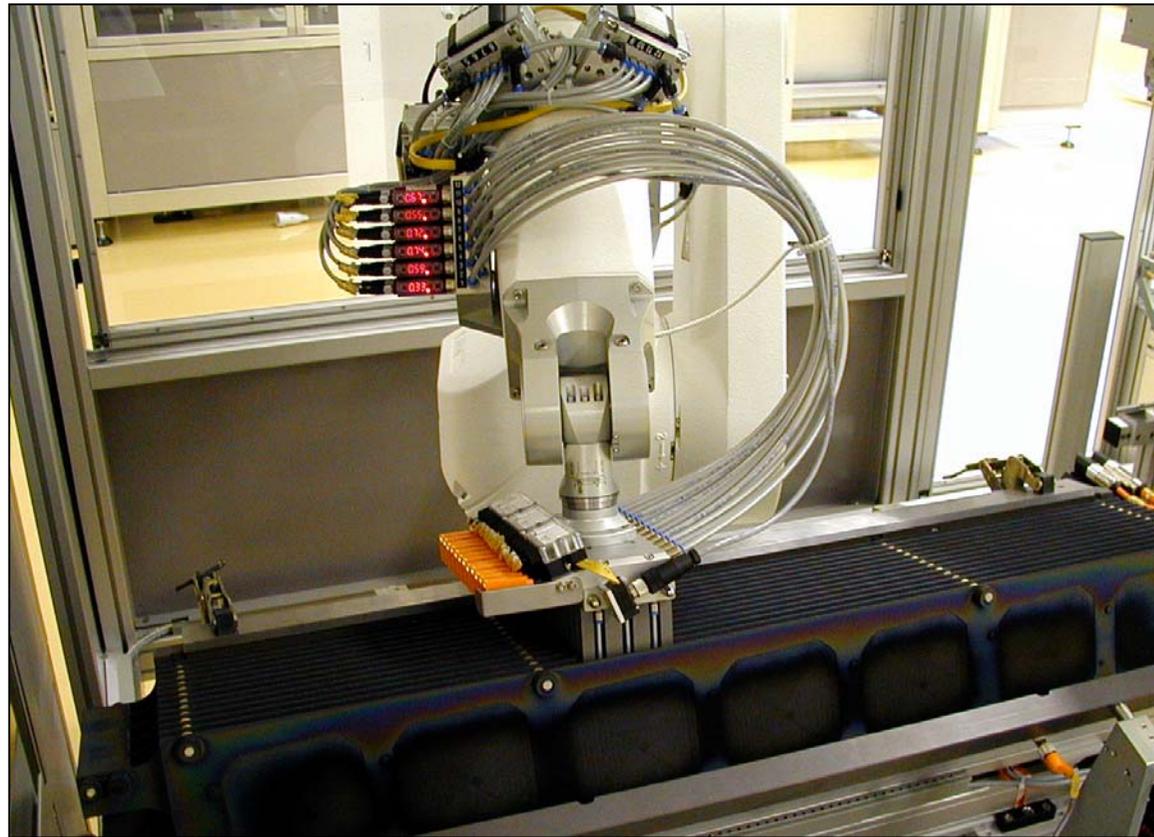


Quelle: Photon International 2004

Produktionstechnologie

Die Solarzellenfabrik
„von heute“:

Hochautomatisierte
Produktionsstätten
ausgerüstet mit speziell
für die Photovoltaik
entwickelten Geräten.



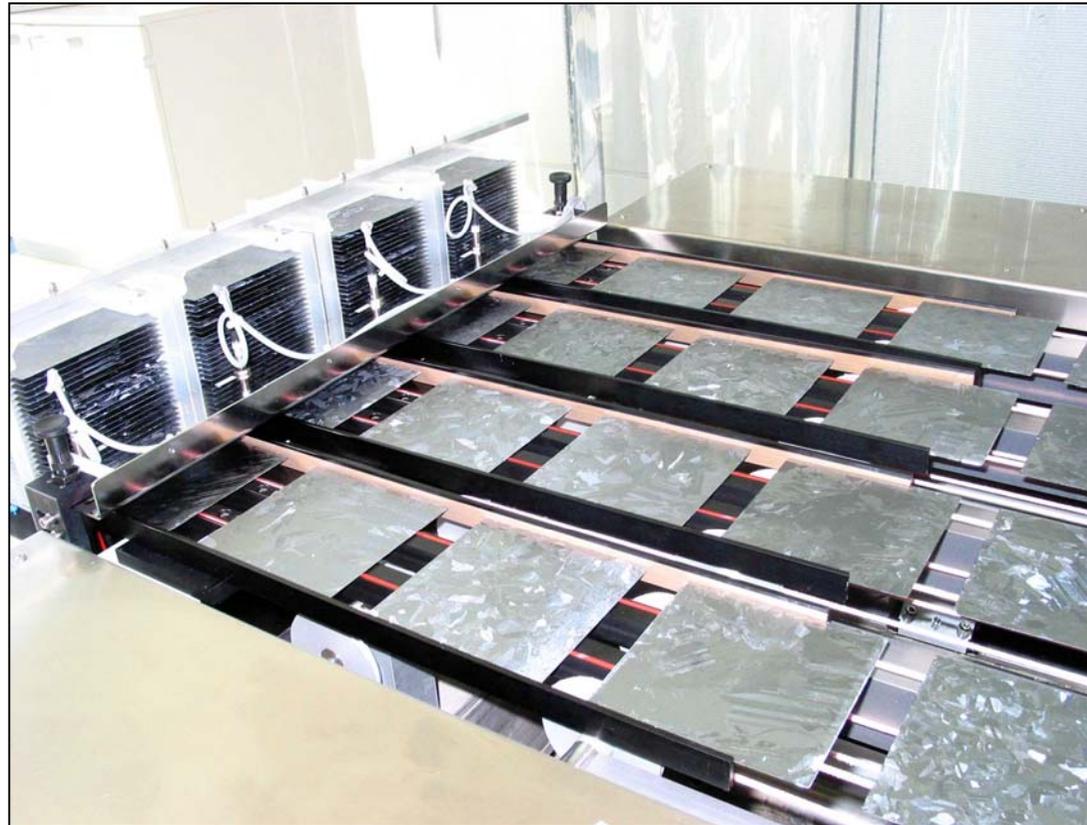
Quelle: Deutsche Cell, Freiberg



Produktionstechnologie

Die Solarzellenfabrik
„von heute“:

Hochautomatisierte
Produktionsstätten
ausgerüstet mit speziell
für die Photovoltaik
entwickelten Geräten.



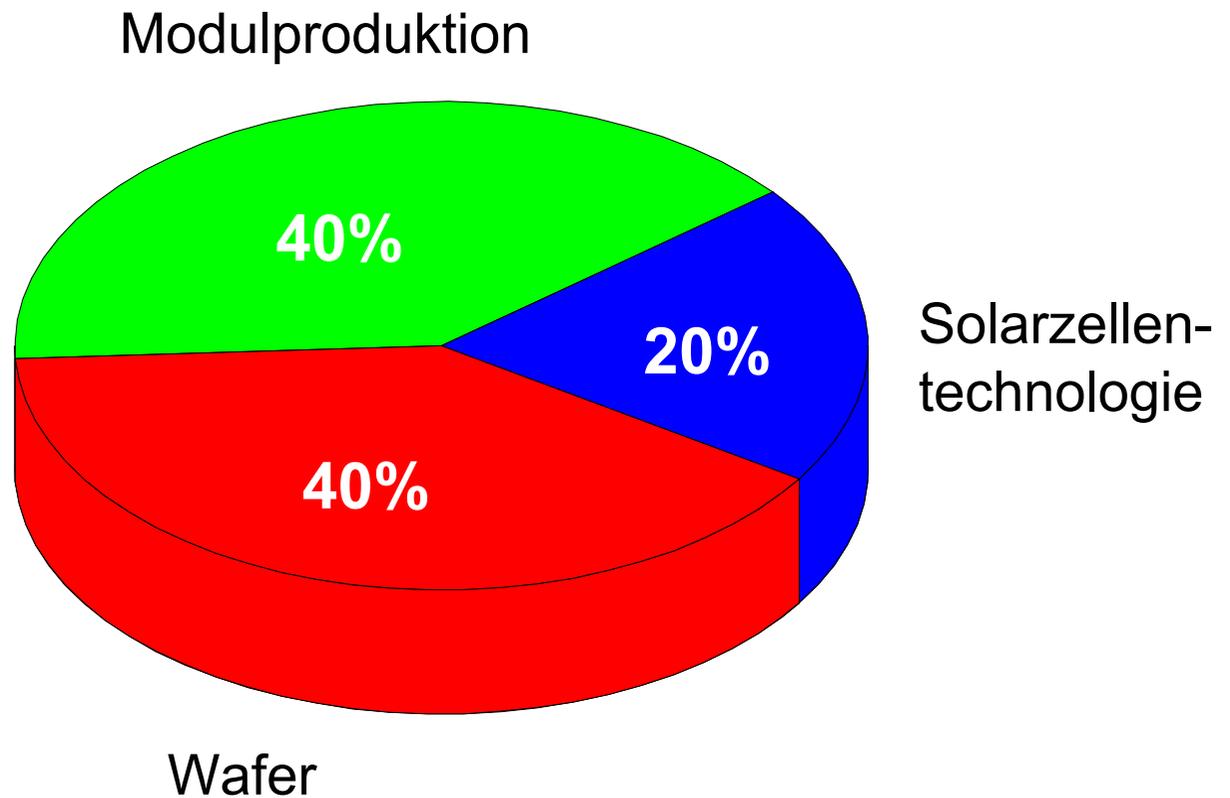
Quelle: Fraunhofer ISE

Das Ziel: Kostenreduzierung

Kostenfaktor **Silicium**

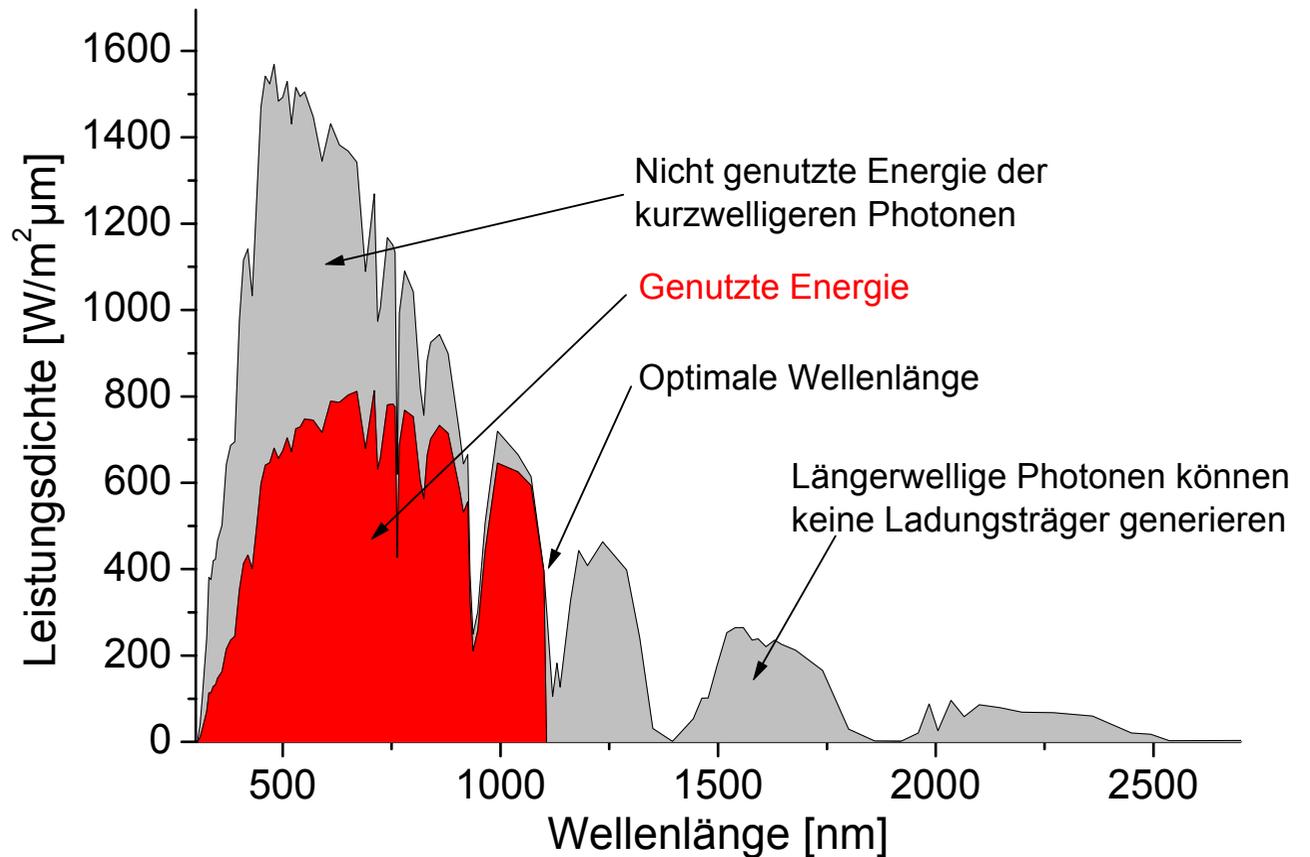
- ⇒ Reduzierung der Waferdicke
- ⇒ Erhöhung des Wirkungsgrades

Industrie $\eta = 14 - 16\%$
Labor $\eta > 20\%$

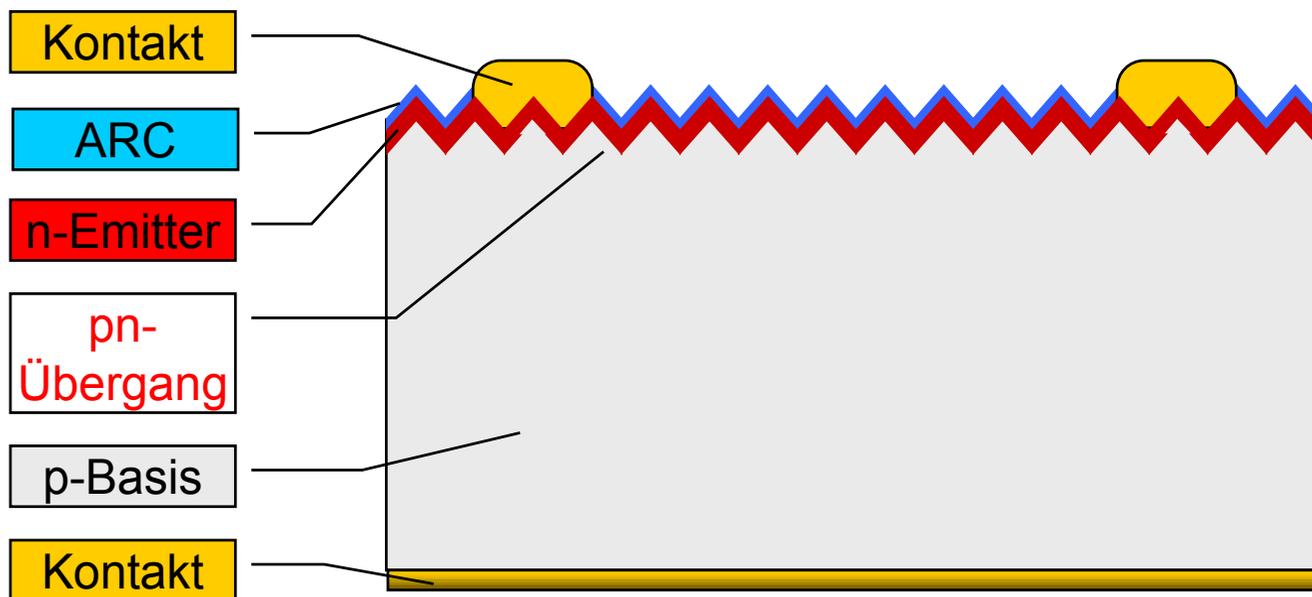


Welchen Wirkungsgrad kann man überhaupt erreichen?

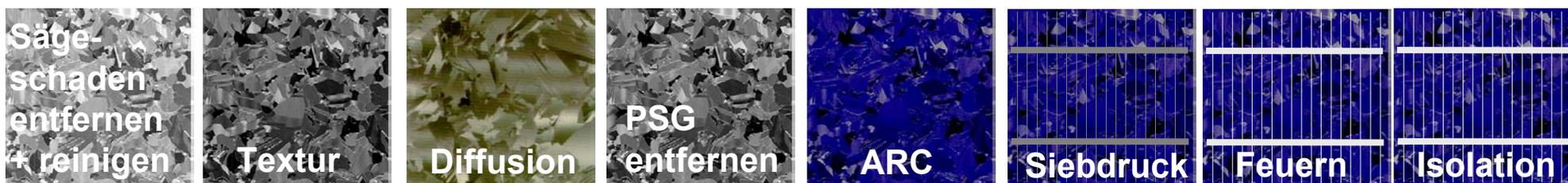
- Shockley, Queisser (1961):
Grenze des Wirkungsgrades einer einfachen Solarzelle = 33% (AM1.5)
- Größter Verlust:
Thermalisierung und Nichtabsorption
- Beste Siliciumzelle = 24.7%
- 75% des möglichen Wirkungsgrades!



Zelltechnologie - Stand der Technik



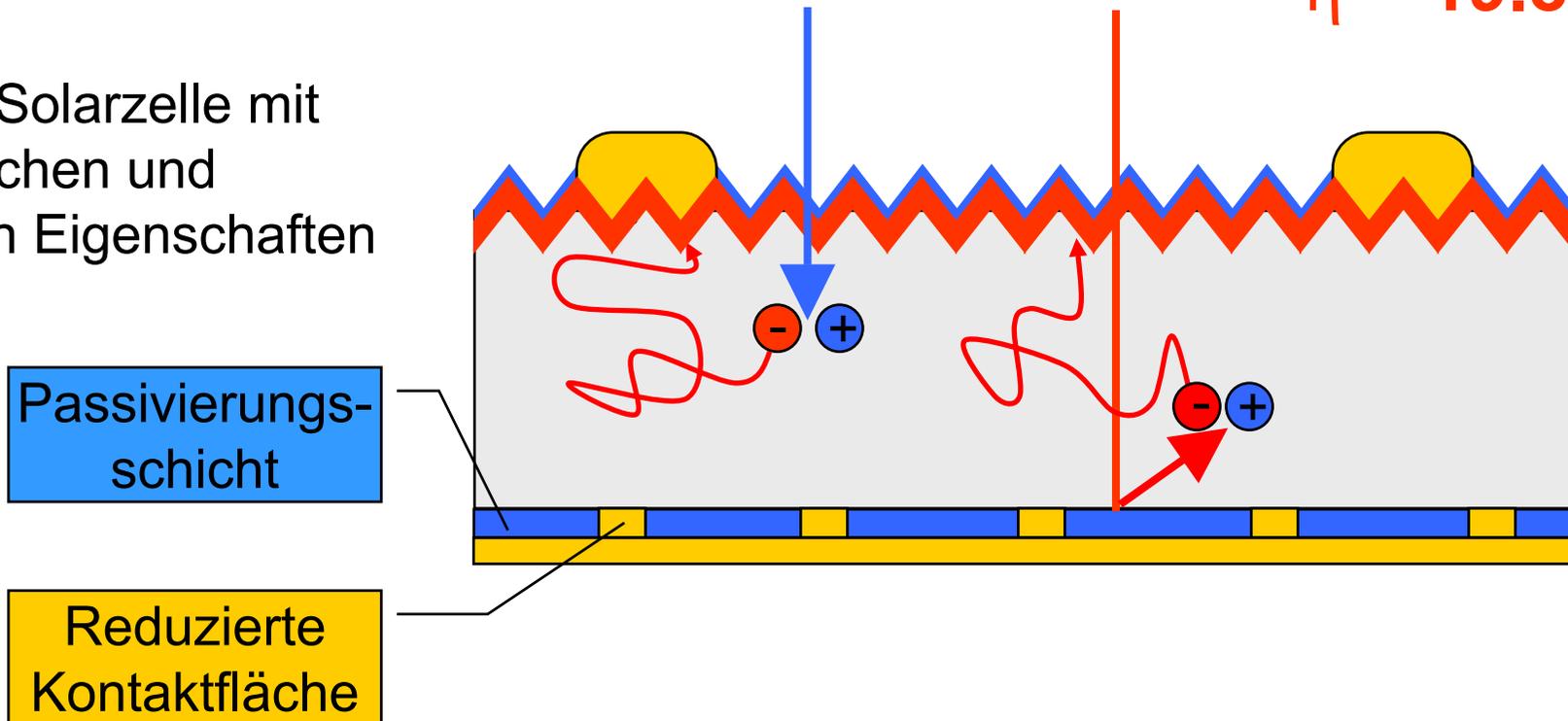
Herstellungsprozess



Schritt II: Dünne Zelle mit optimierter Rückseite

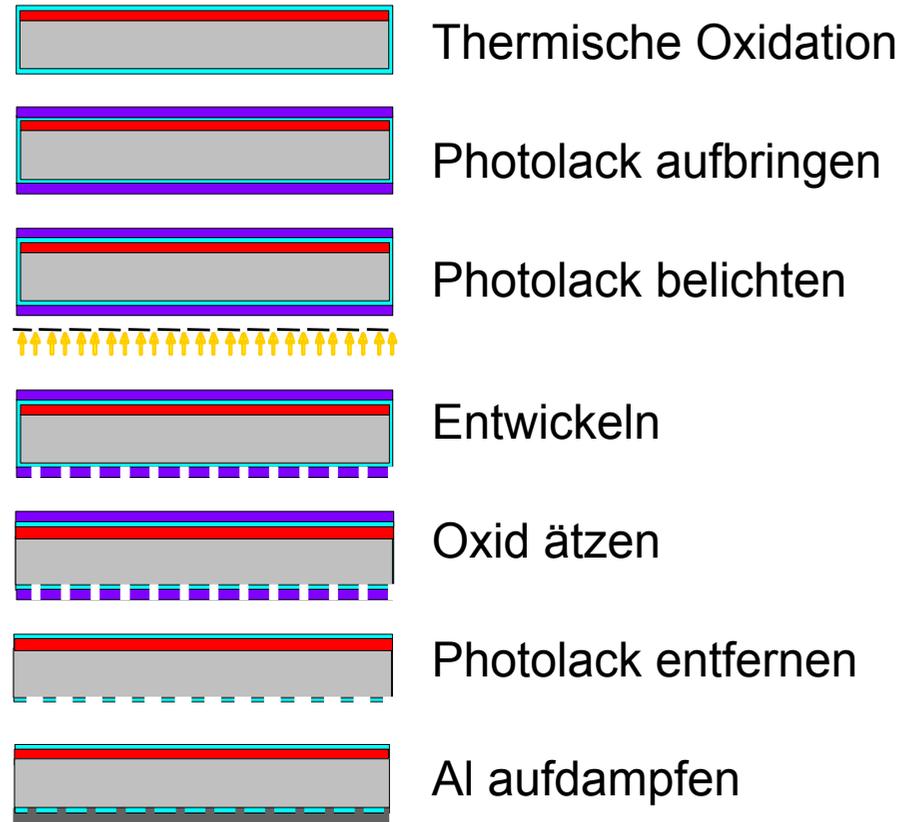
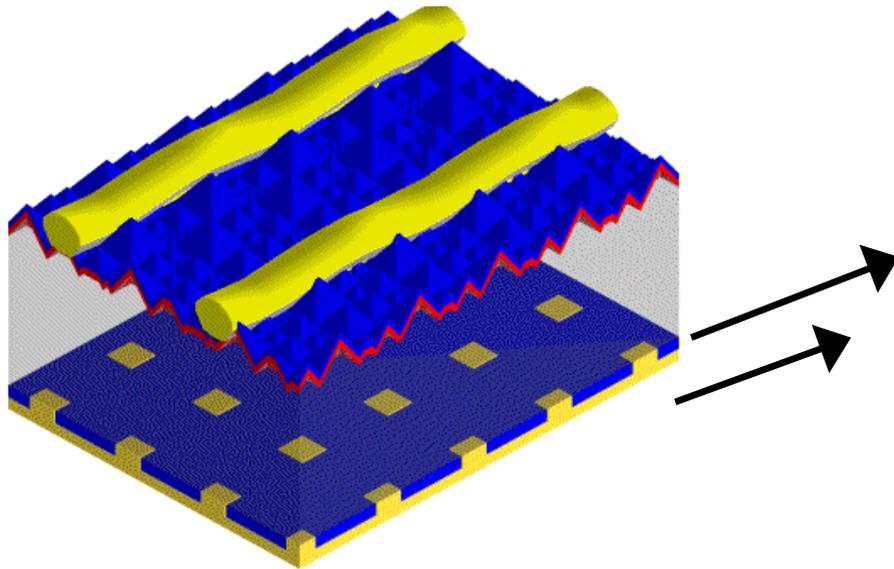
$\eta = 19.8 \%$

Optimierte Solarzelle mit guten optischen und elektrischen Eigenschaften



Problem: Aufwendige Herstellung

Prozeßfolge im Labor:

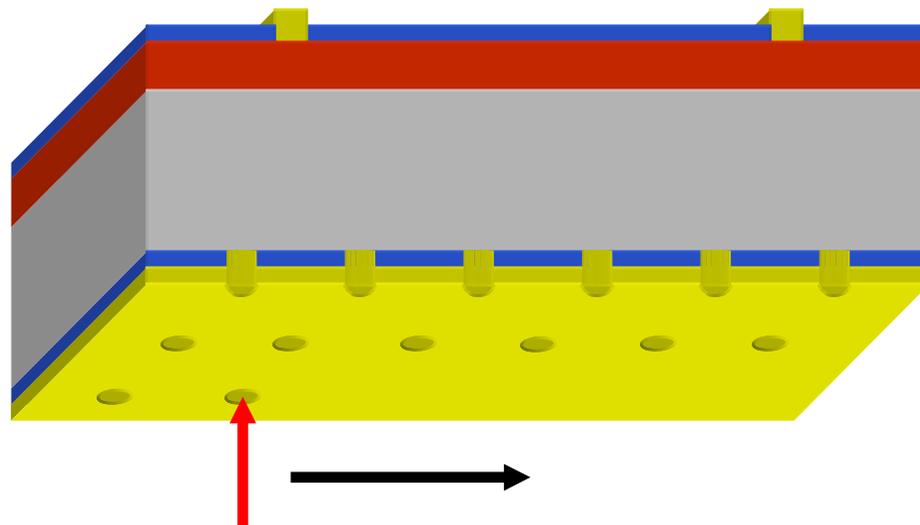


Laser-Fired Contacts (LFC)

Wie man eine ideale Rückseite in drei Prozeßschritten herstellen kann:

1. Passivierung (SiO_2 , SiN)
2. Metallisierung (Al)
3. Laserfeuern der Punktkontakte

Patent angemeldet

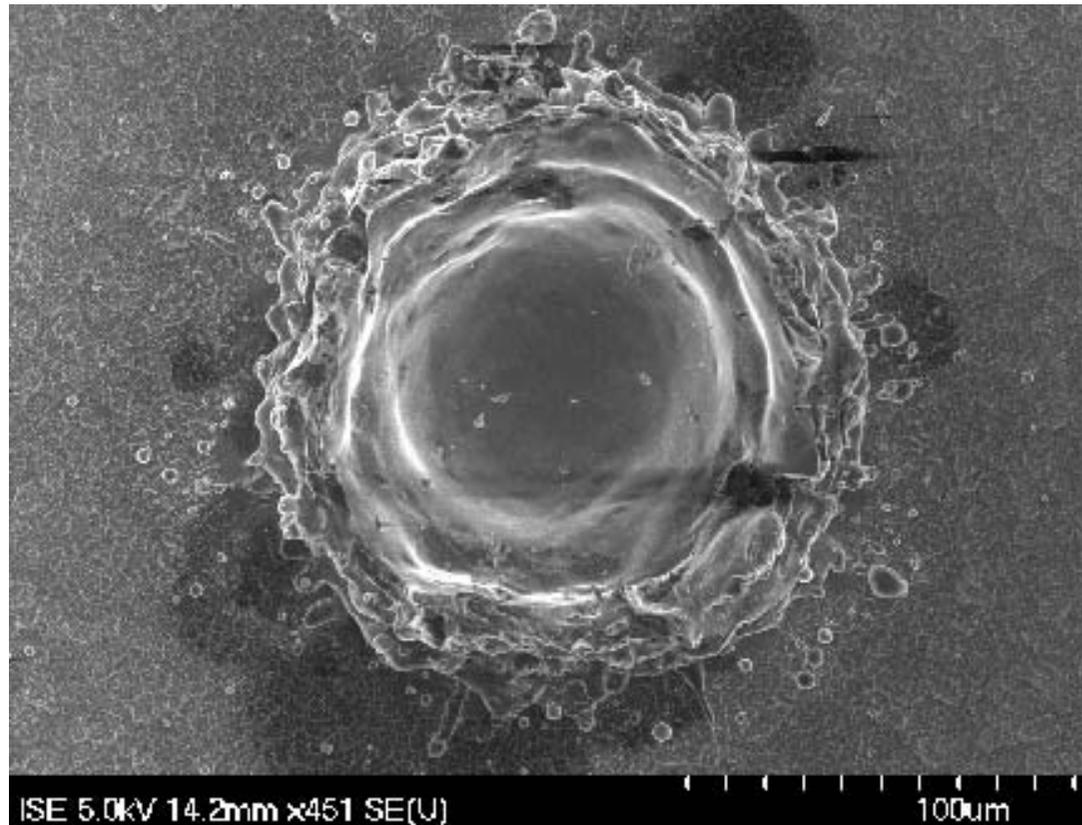


Laser-Fired Contacts (LFC)

Bester Wirkungsgrad

21.5 %

Aber: *Schnell genug?*



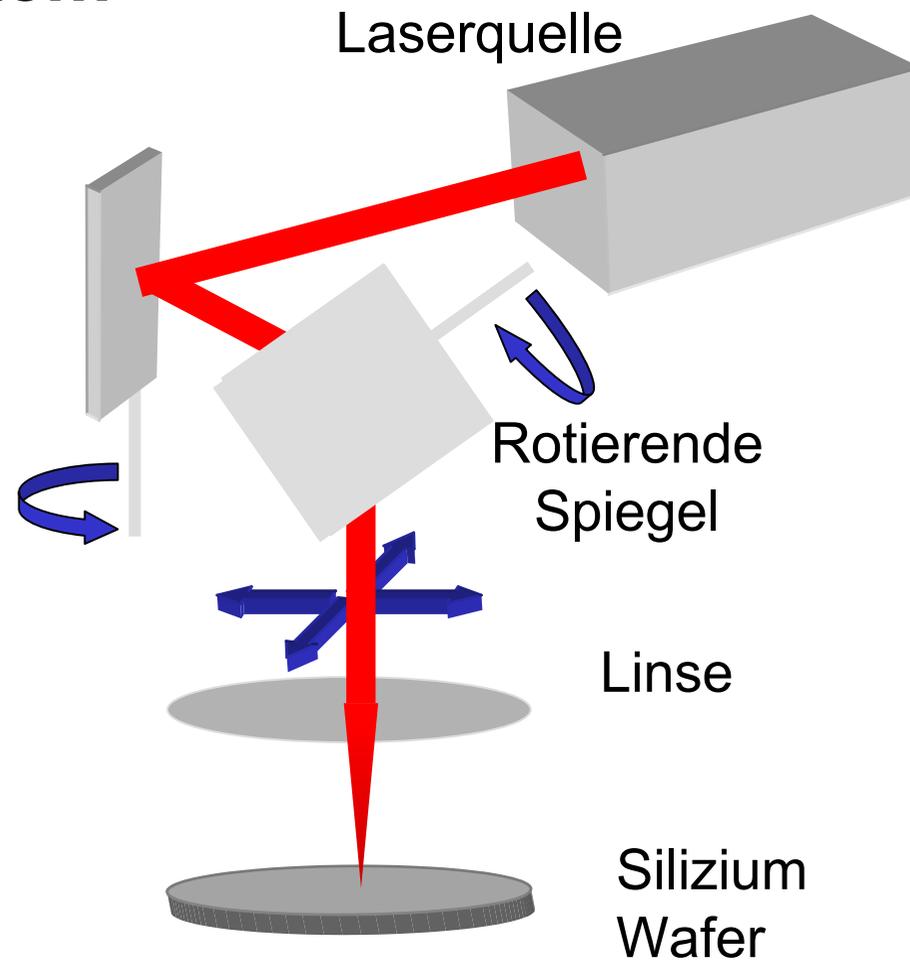
REM-Aufnahme eines Laser-fired Contacts

LFC Pilotlinien-Lasersystem

Pilotliniensystem für LFC
am Fraunhofer ISE

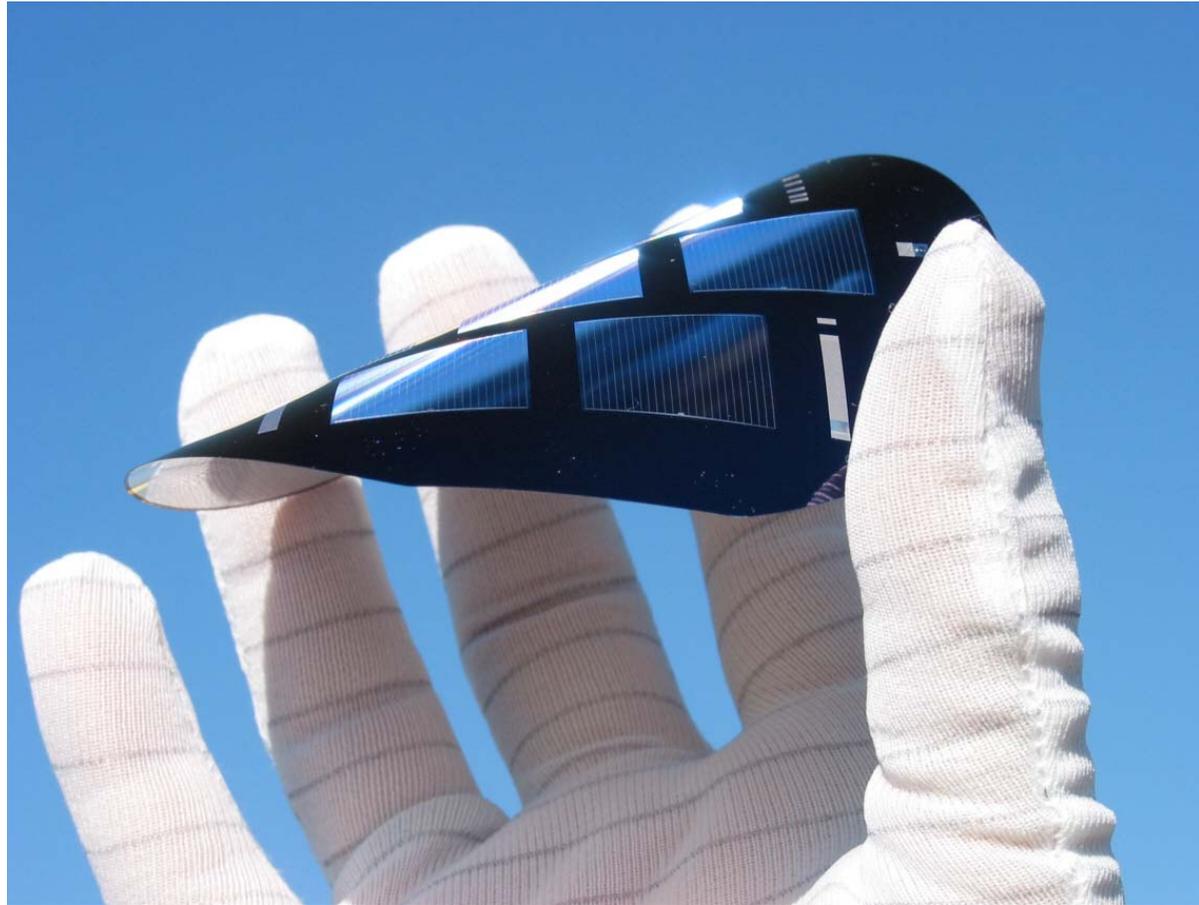
Anforderung:
weniger als
3 s pro Wafer

Automatisiertes
Nd:YAG Lasersystem
mit Scanner-Kopf

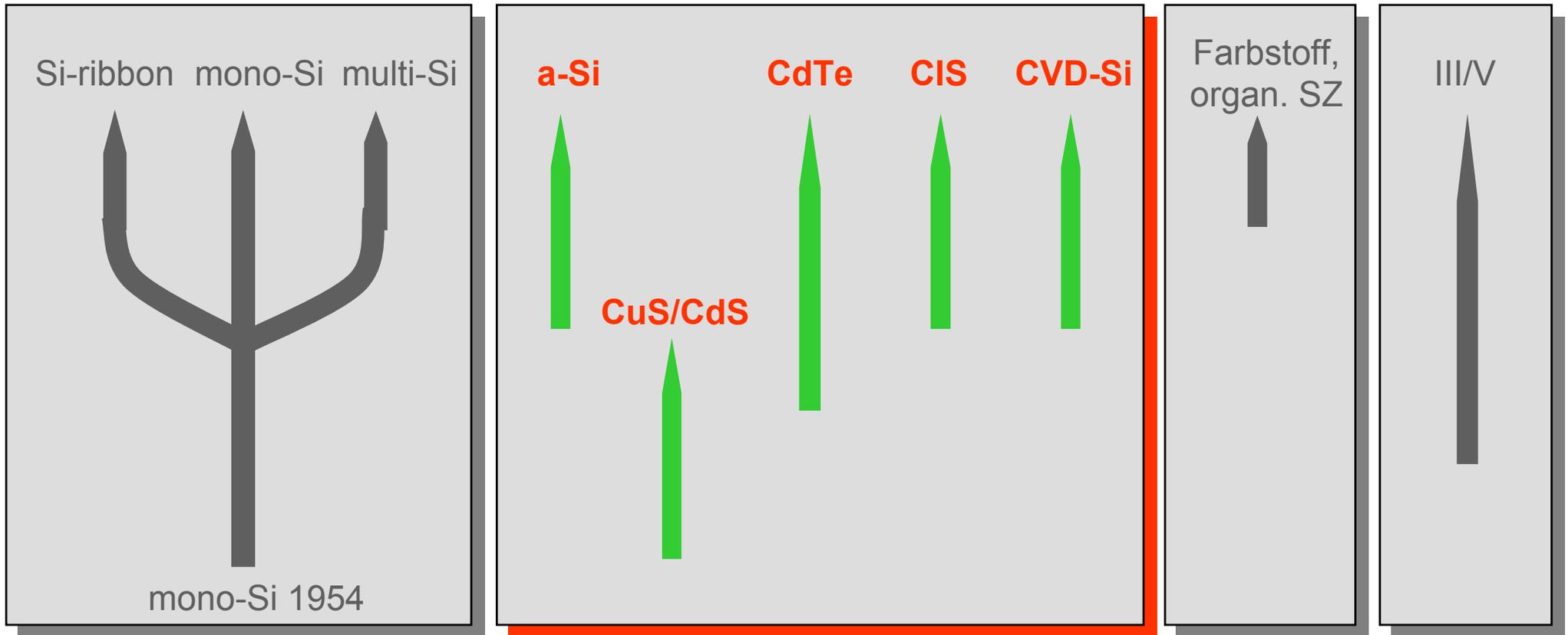


Dünne und flexible Si-Solarzellen (LFC-Technologie)

- Wafer = 42 μm
- Wirkungsgrad = 20.2%

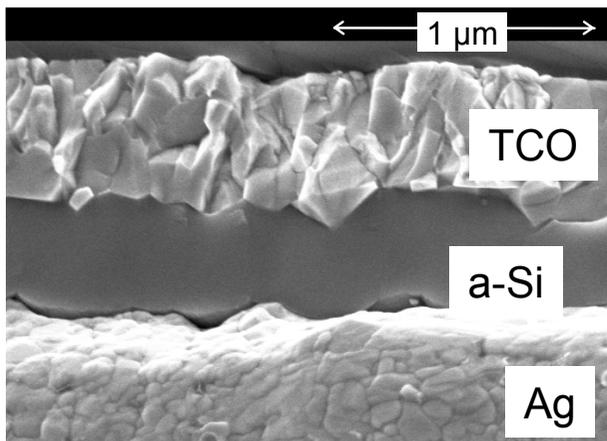


Dünnschichtsolarzellen



Dünnschichtsolarzellen: Amorphes Silizium

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



Quelle: Forschungszentrum Jülich

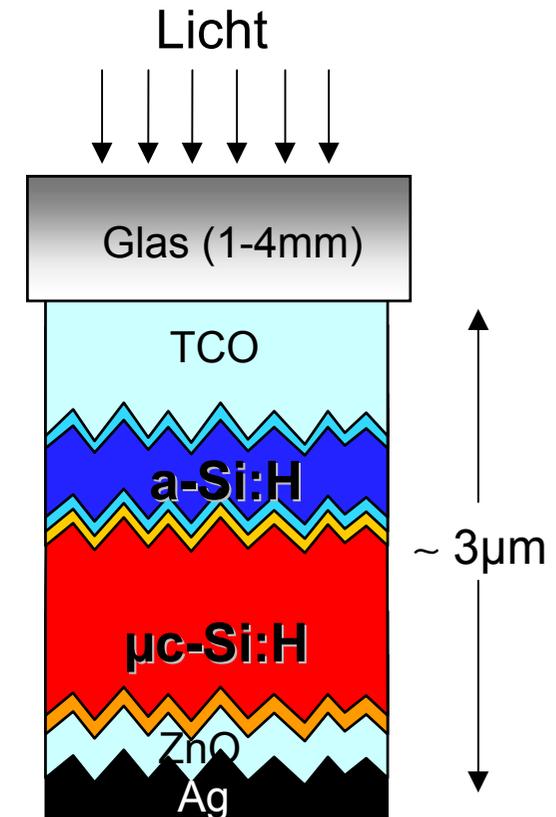
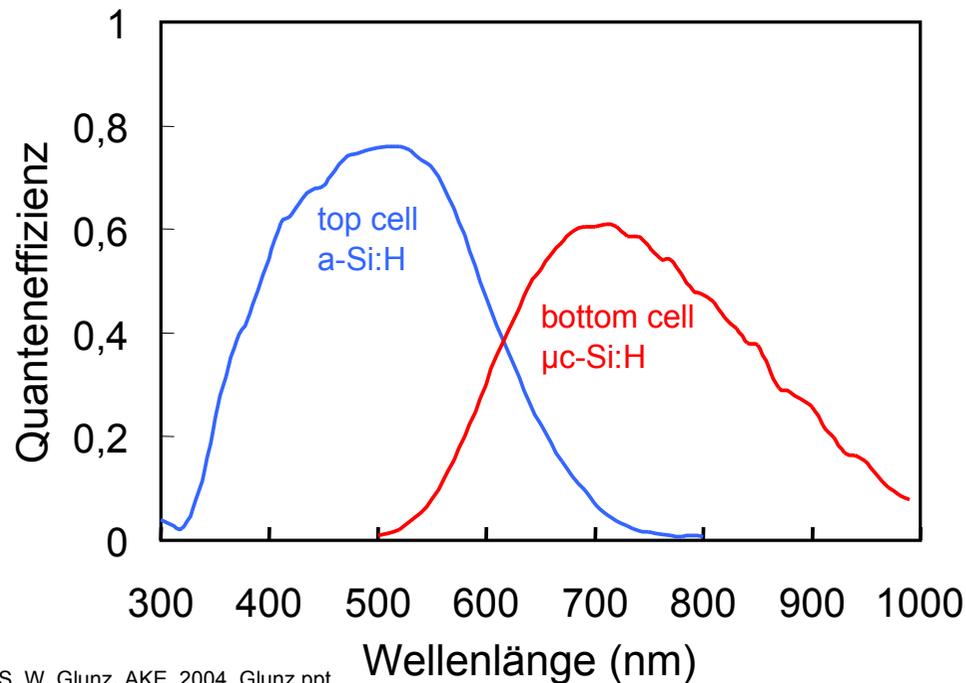
S. W. Glunz, AKE 2004 Glunz.ppt



Gebäudeintegrierte a-Si Technik: Stillwell Avenue Terminal, New York
ca. 5000 m², Quelle: RWE SCHOTT Solar

Dünnschichtsolarzellen: Amorphes + mikrokrist. Silicium

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

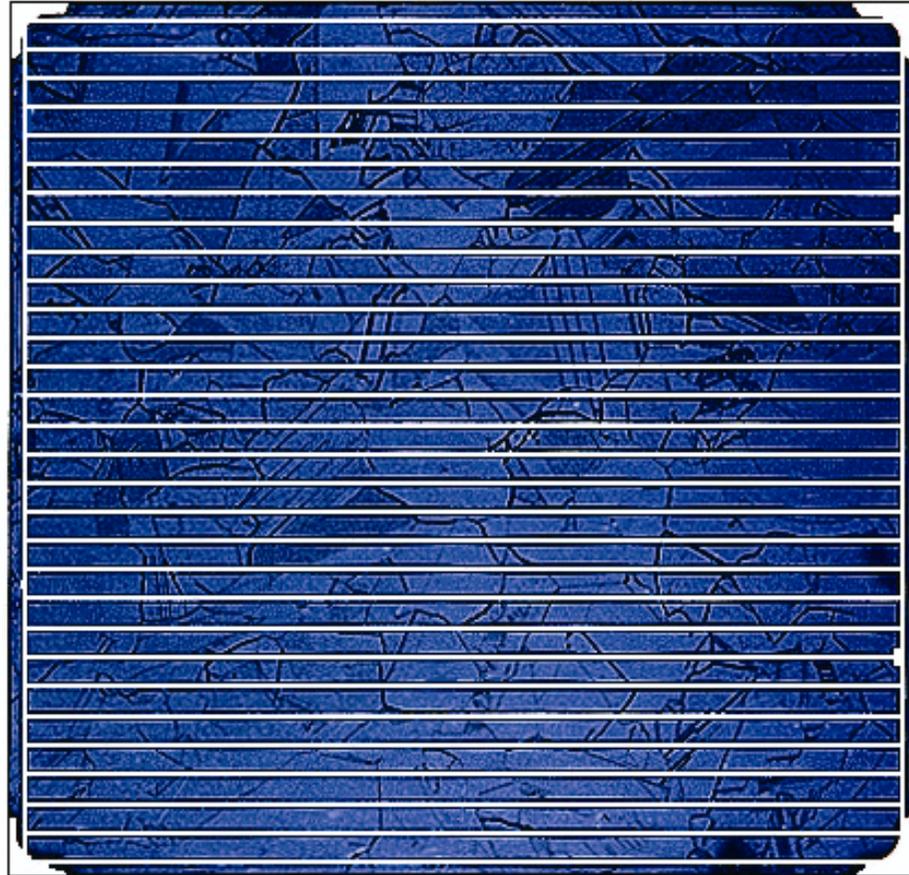


Quelle: Forschungszentrum Jülich

Dünnschichtsolarzelle: Kristallines Silicium

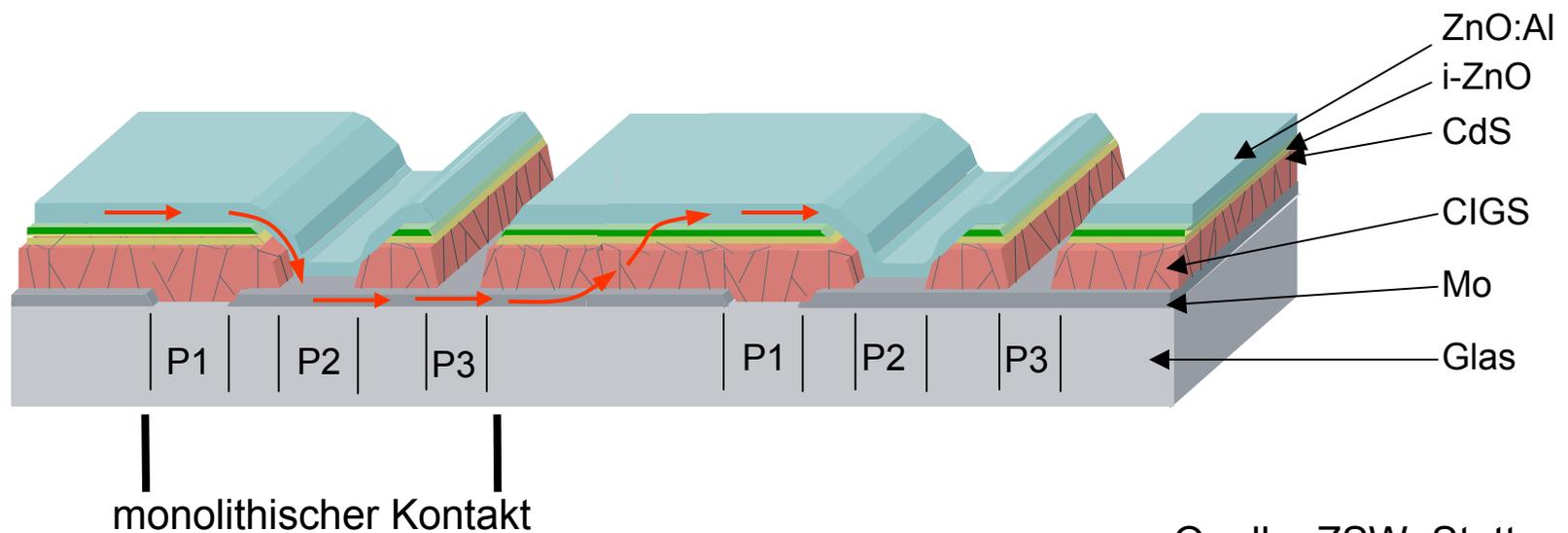
Hochtemperatur-
beständiges Substrat

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



Dünnschichtsolarzellen: CIS

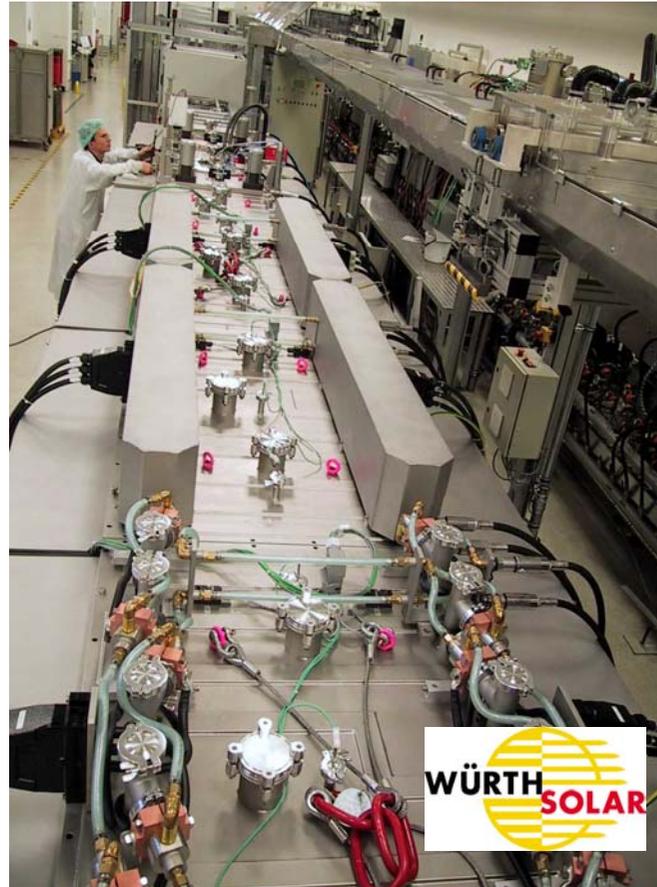
- $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$
- Hohe Laborwirkungsgrade (19%)
- Monolithische Serienschaltung



Quelle: ZSW, Stuttgart

Dünnschichtsolarzellen: CIS

Serienfertigung

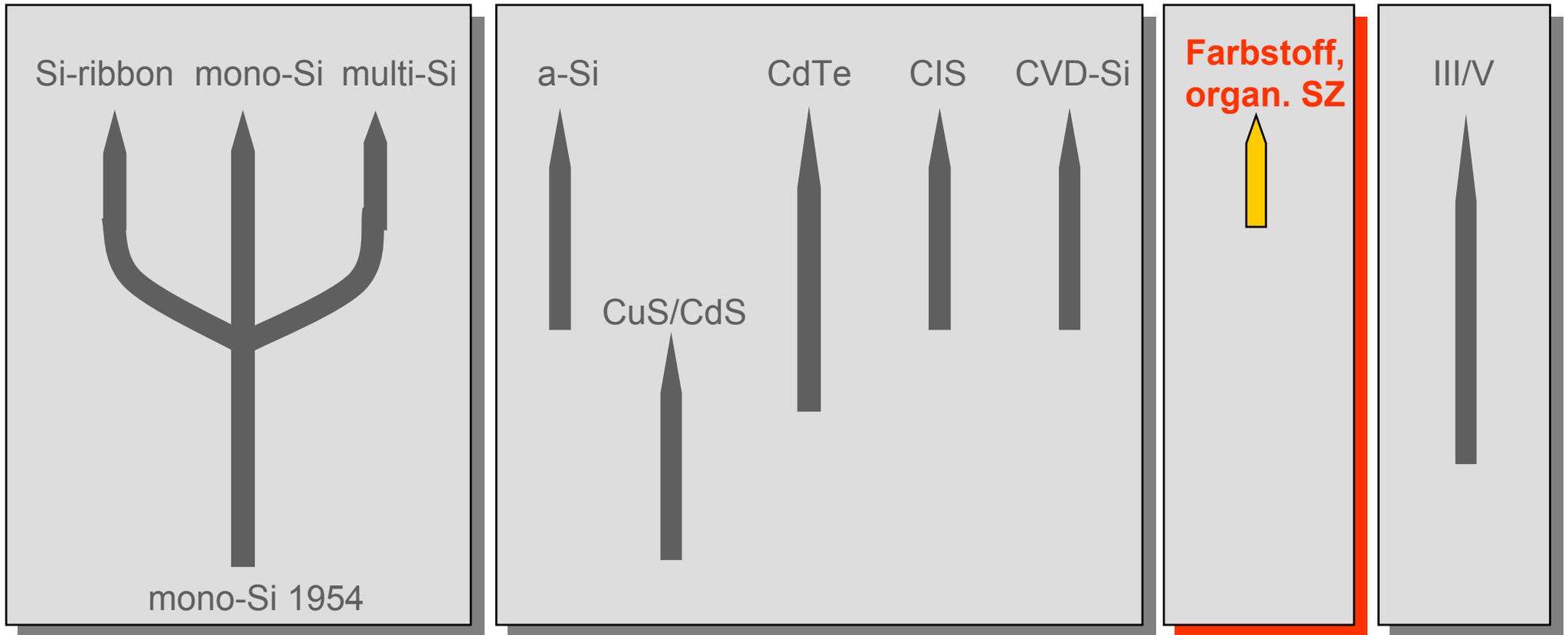


Quelle: Würth Solar

S. W. Glunz, AKE 2004 Glunz.ppt

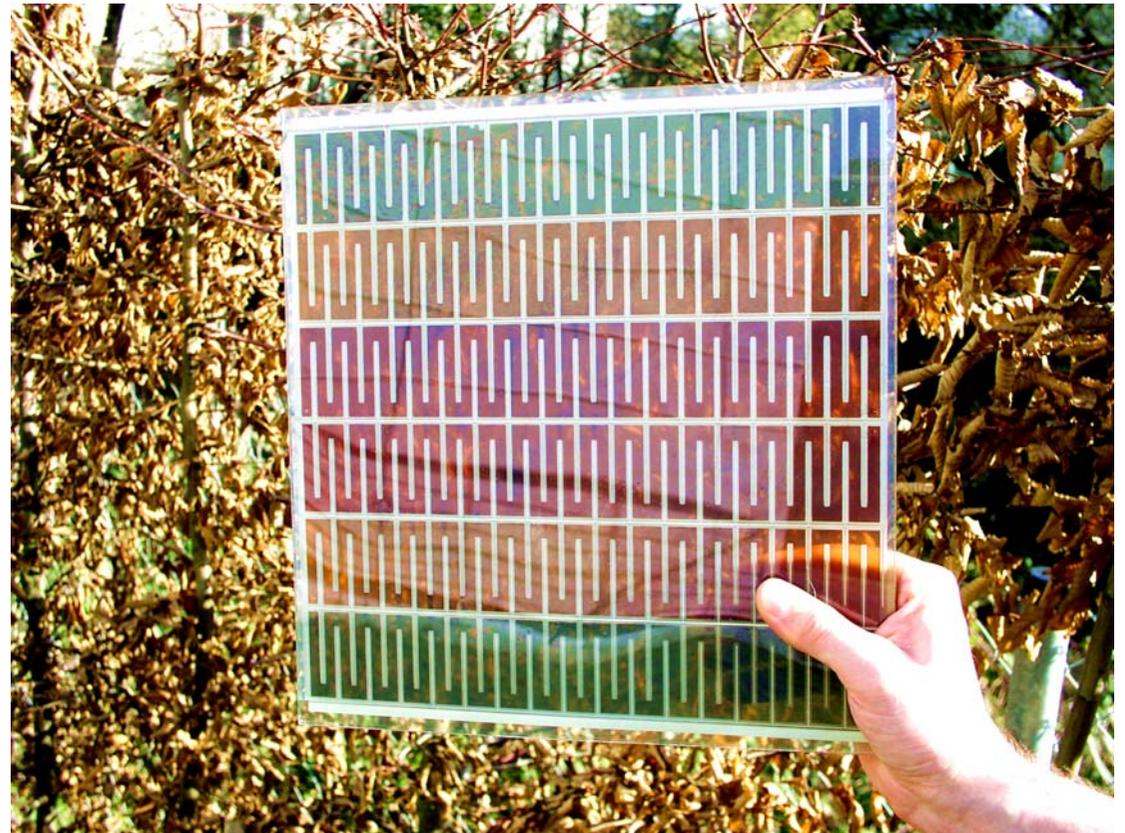
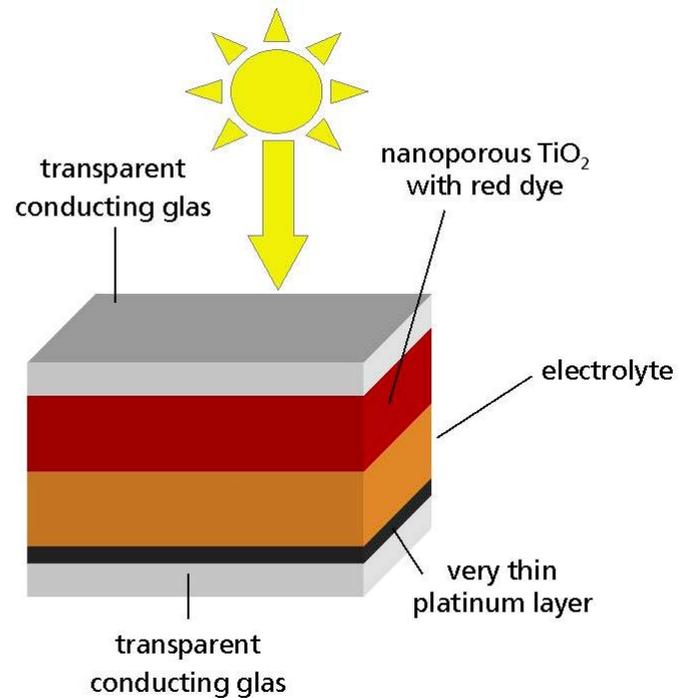


Alternative Materialien



Alternative Materialien: Farbstoffsolarzellen

- Wirkungsgrade bis 10%
- Neue Anwendungsfelder



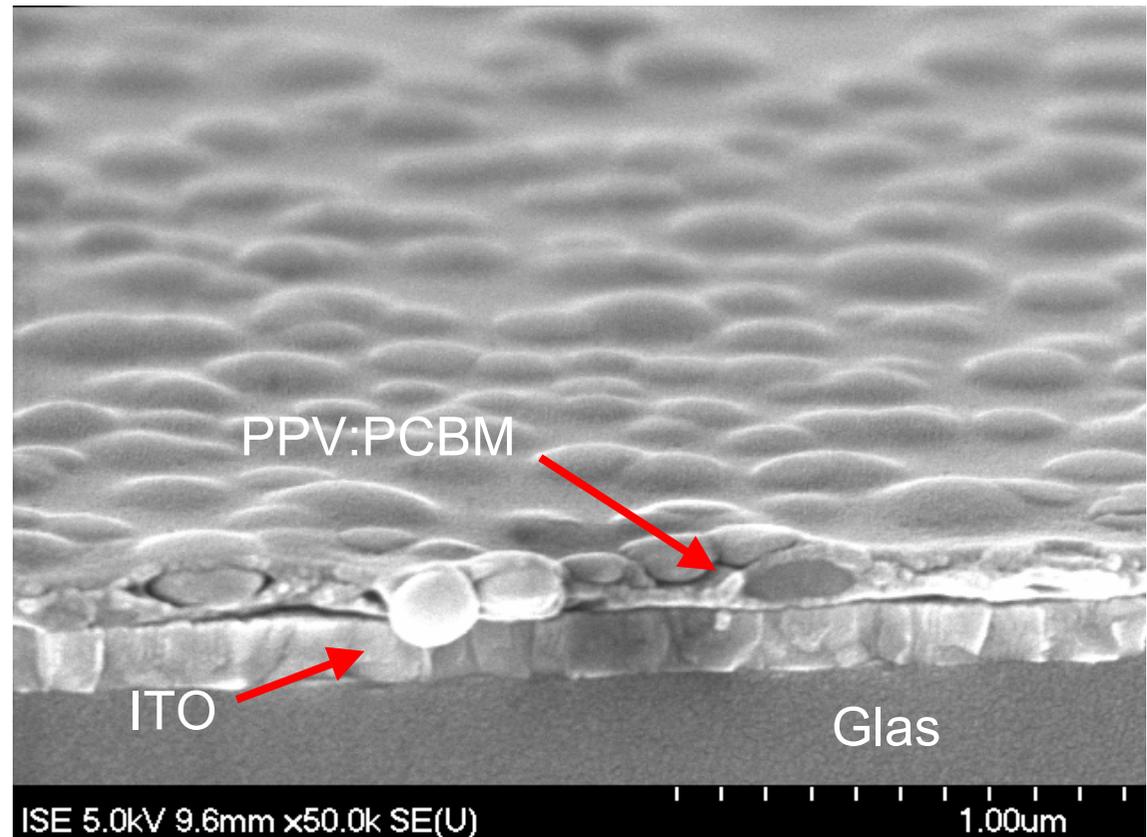
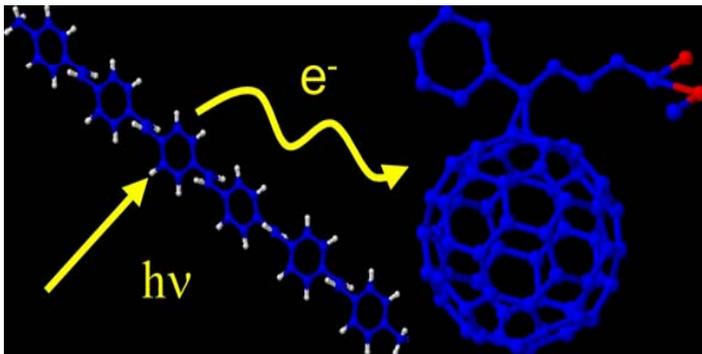
Alternative Materialien: Organische Solarzellen

Wirkungsgrade bis 5%

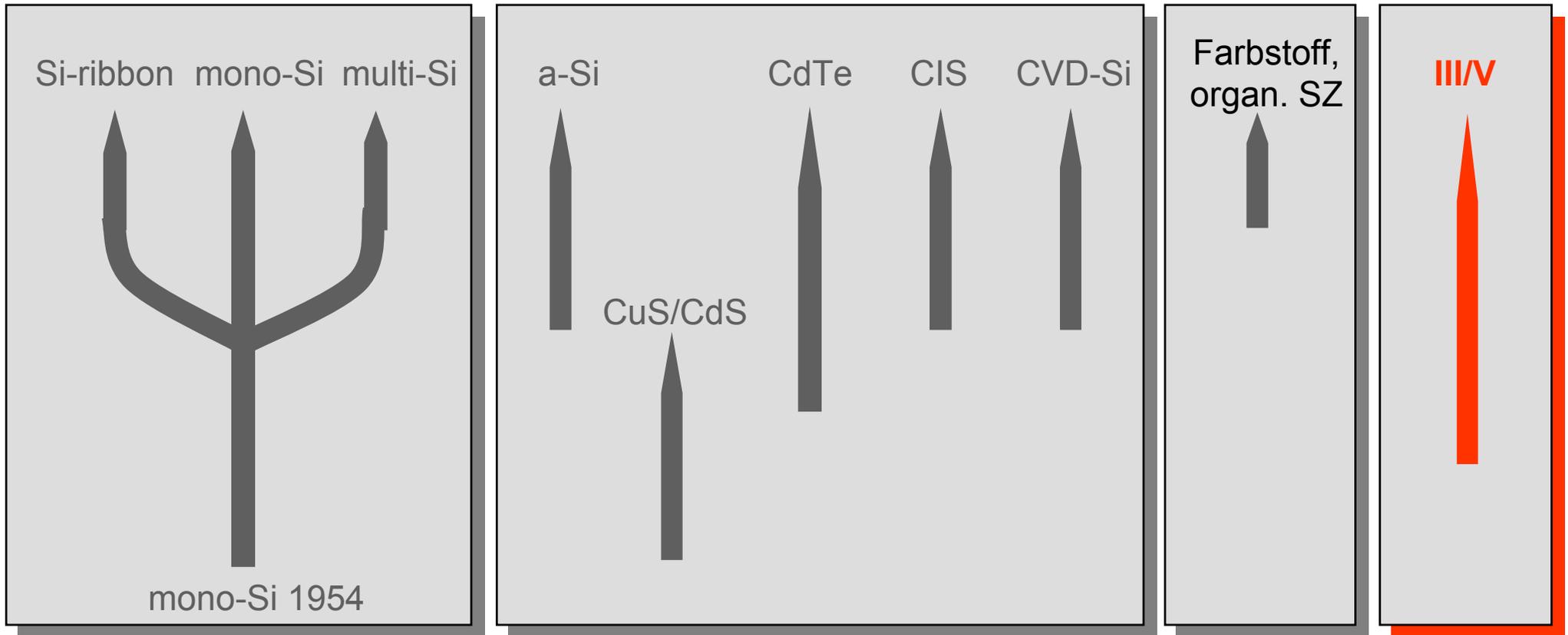
Polymerblend:

PCBM: C60-Molekül

PPV: Konjugiertes Polymer



III-V Solarzellen und neue Konzepte

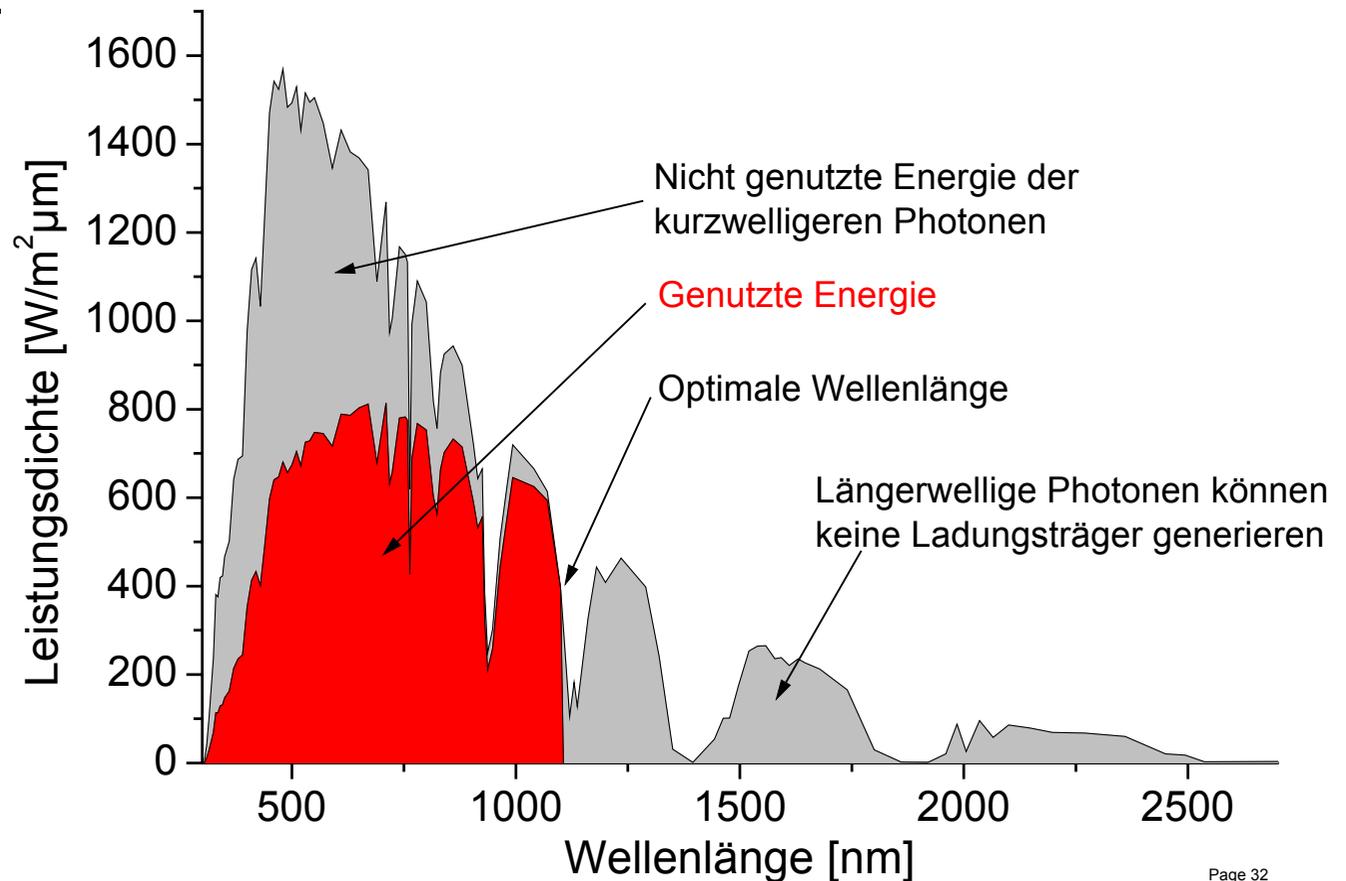


Jenseits des Shockley-Queisser Limits

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

Spektral bedingte Verluste

- Thermalisierungsverluste
- Nichtabsorption



Jenseits des Shockley-Queisser Limits

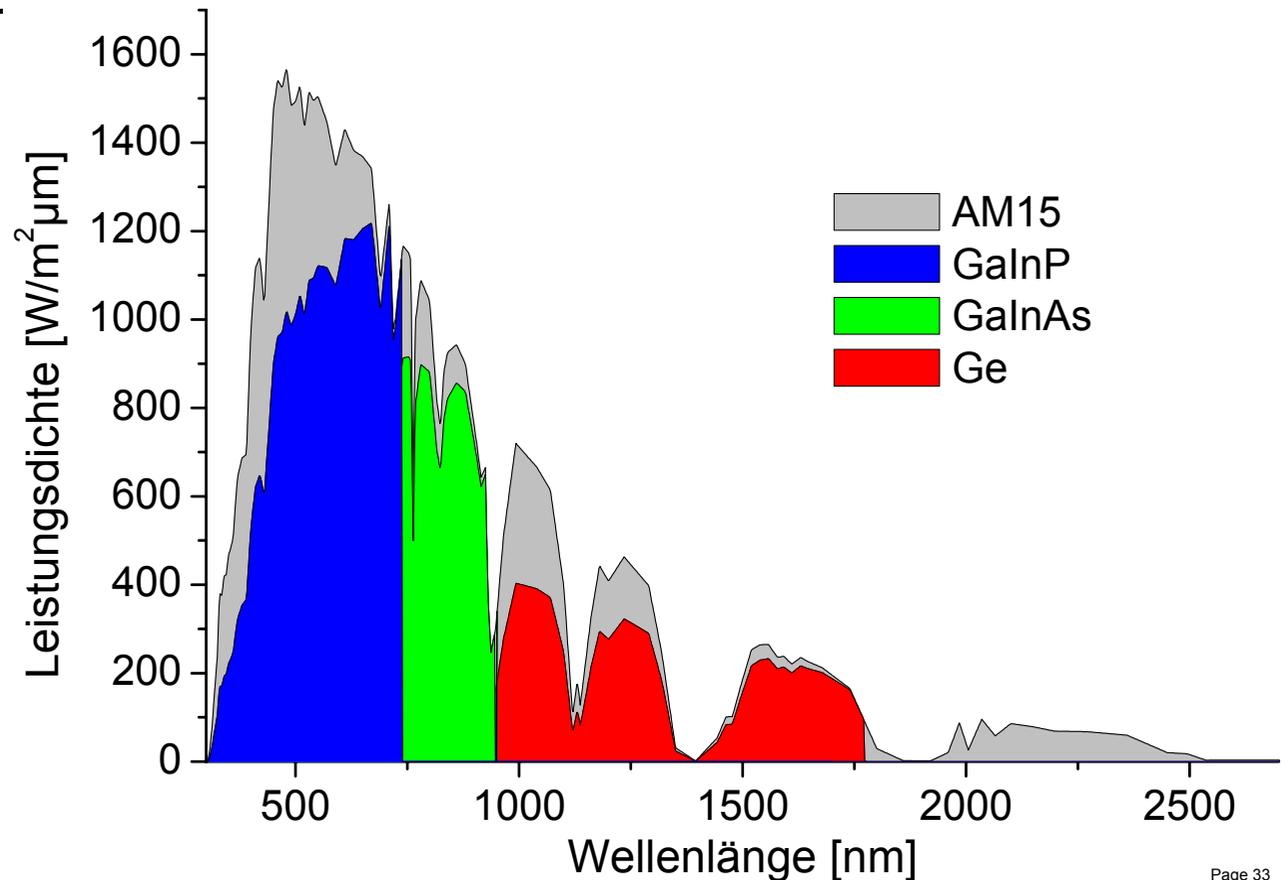
“Überwindung” des Shockley-Queisser-Limits (33%)

Spektral bedingte Verluste

- Thermalisierungsverluste
- Nichtabsorption

⇒ Tandemzellen 45.3%
Trippelzellen 51.2%
Quadrupelzellen 54.9%

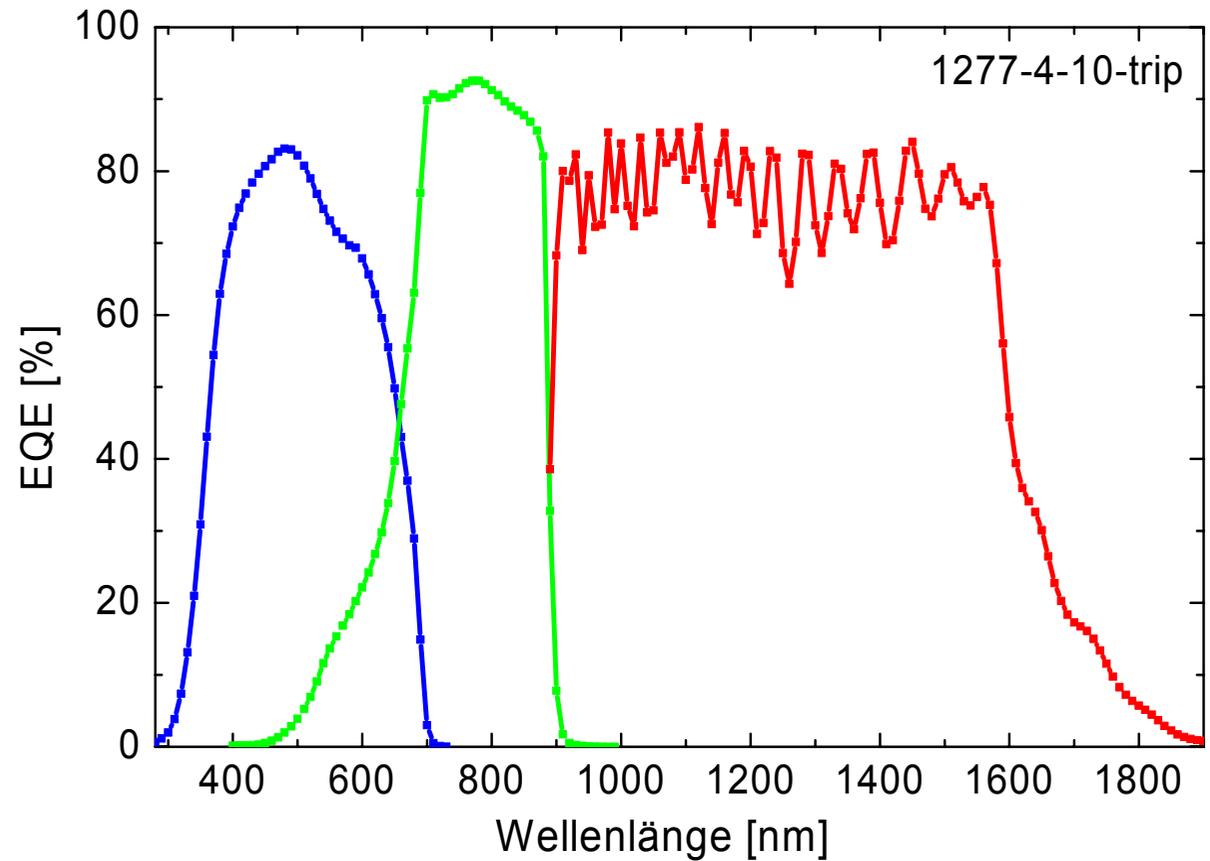
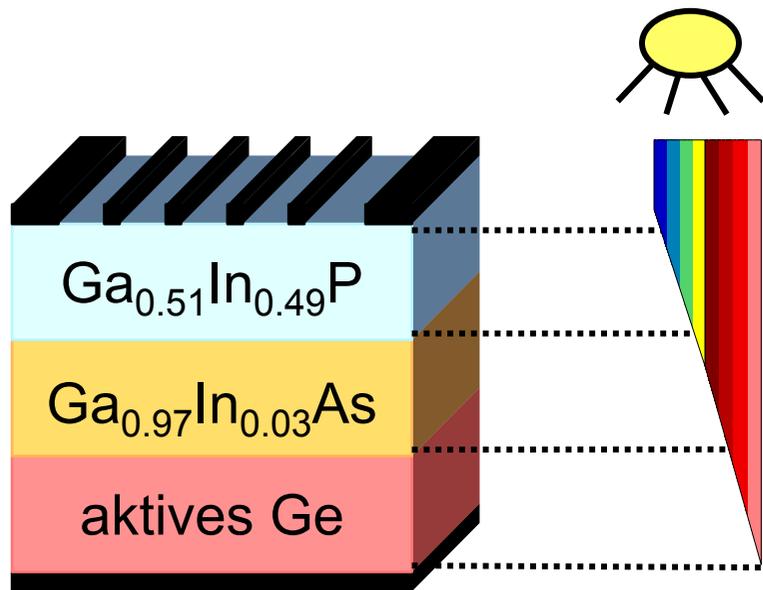
...



Tripelsolarzellen aus III-V Halbleitern

Hohe Wirkungsgrade > 30%

Beste Tripelzelle 36.9%



Herstellung von Tandem- und Tripelzellen

MOVPE-Technologie



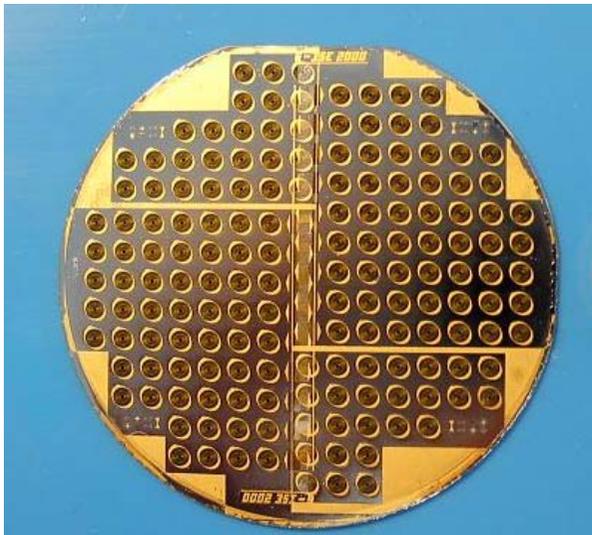
AIX 2600 G3



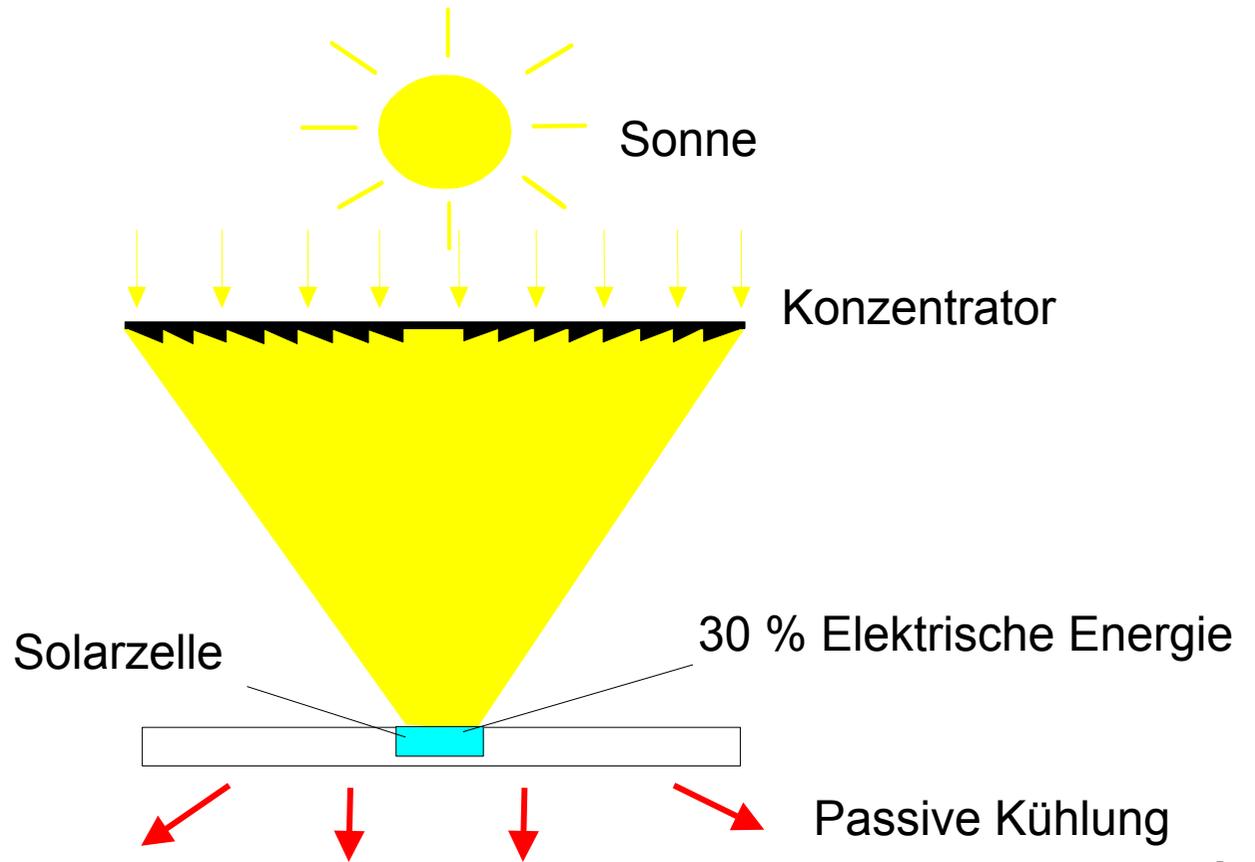
8x4 Zoll Substrate pro Epitaxie

Konzentratorsolarzellen

Ersetze teuren Halbleiter durch billige Optik!



S. W. Glunz, AKE 2004 Glunz.ppt



Konzentratorkraftwerke

Hohe
Modulwirkungs-
grade (22.7 %)



Quelle: Fraunhofer ISE

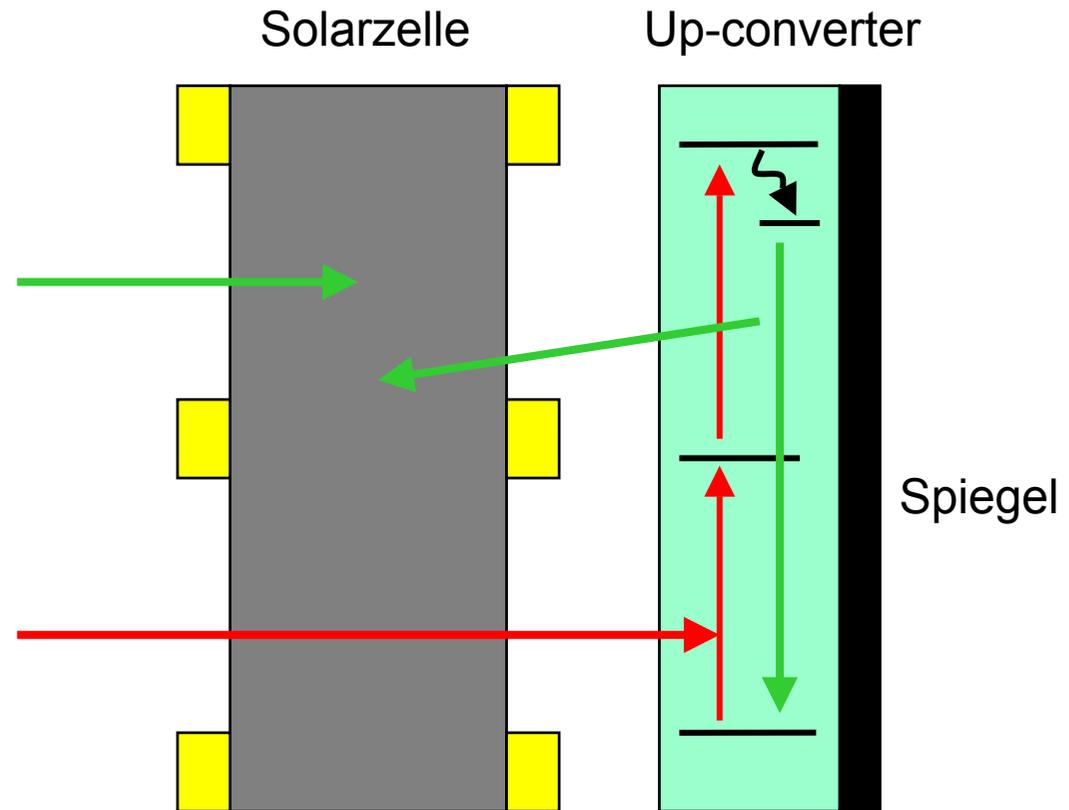


Quelle: Amonix, USA

Up-conversion

Hochkonversion von infraroten Photonen

- Solarzellenstruktur kann bestehen bleiben
- Suche nach idealen Up-convertern
- Hohes Wirkungsgradpotential (47.6% bei unkonz. Sonnenlicht, 63.17% bei max. Konzentration)

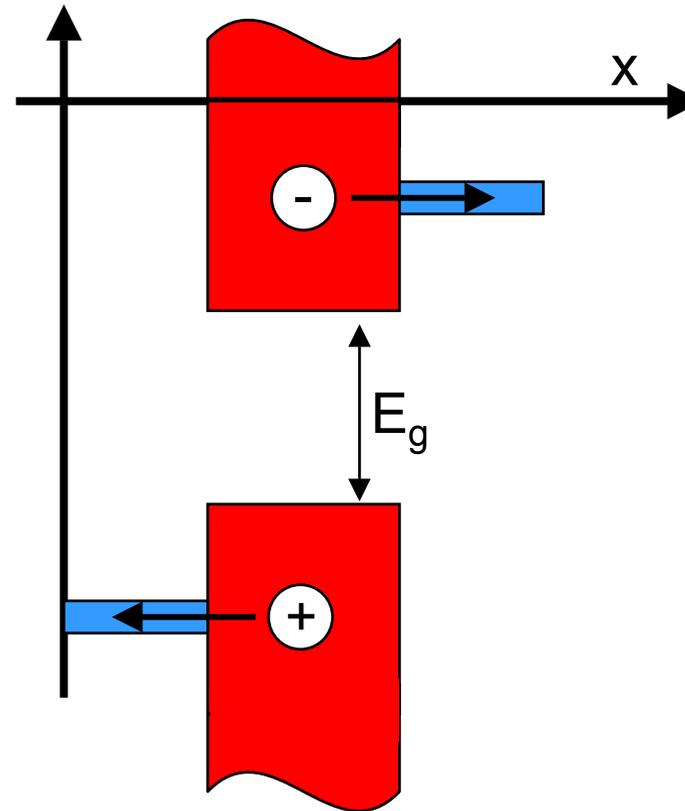


Nach: Truppe und Würfel

Heiße Ladungsträger

Vermeidung der
Thermalisierungsverluste

- Energieselektive Kontakte
- Hohes Wirkungsgradpotential (85% bei max. Konzentration)



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