

Höchsteffiziente Multikristalline Silizium-Solarzellen

Gerhard P. Willeke

Fraunhofer Center für Silizium-Photovoltaik CSP



Halle (Saale)

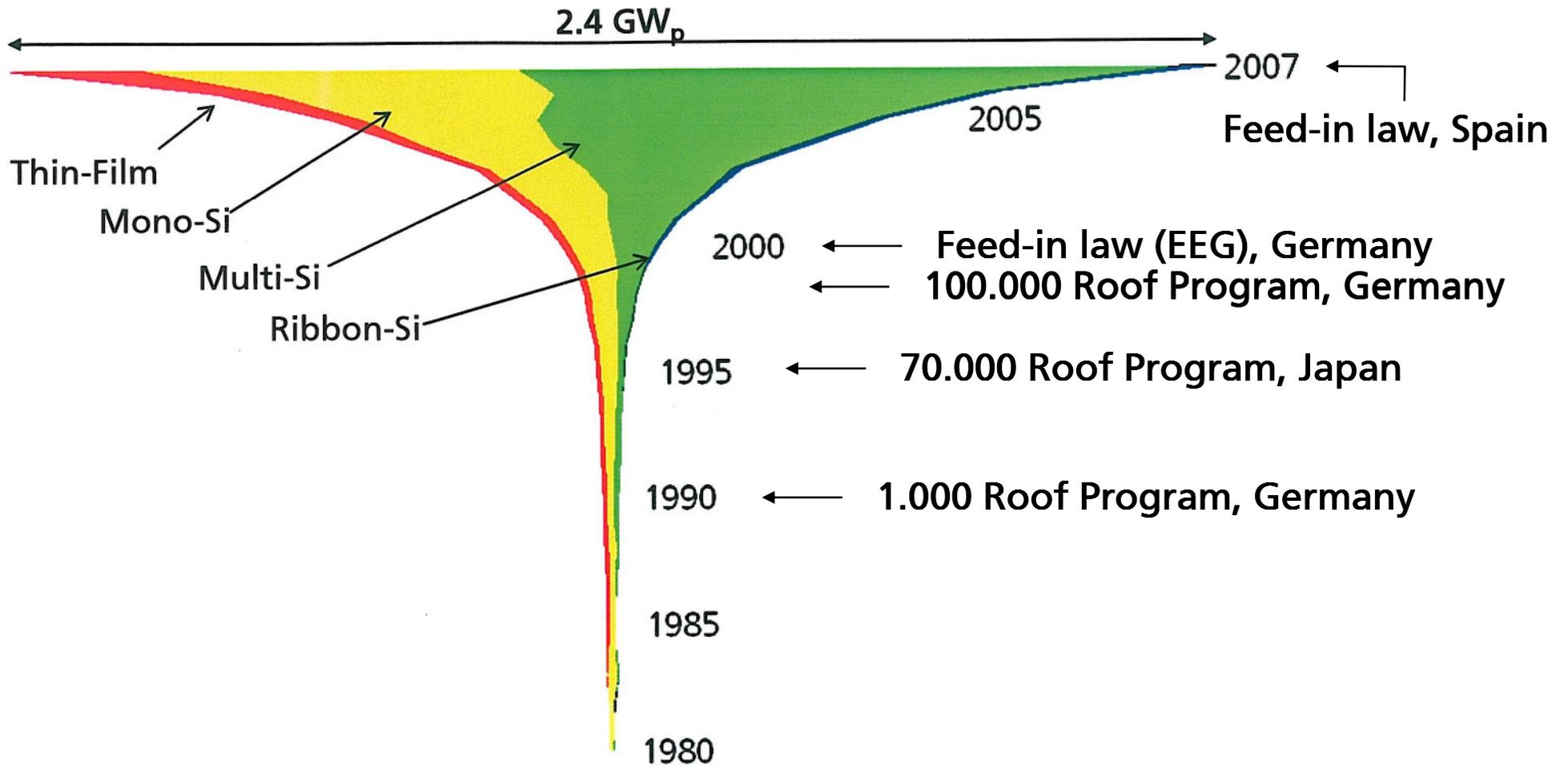


Fraunhofer ISE, Freiburg i.Br.

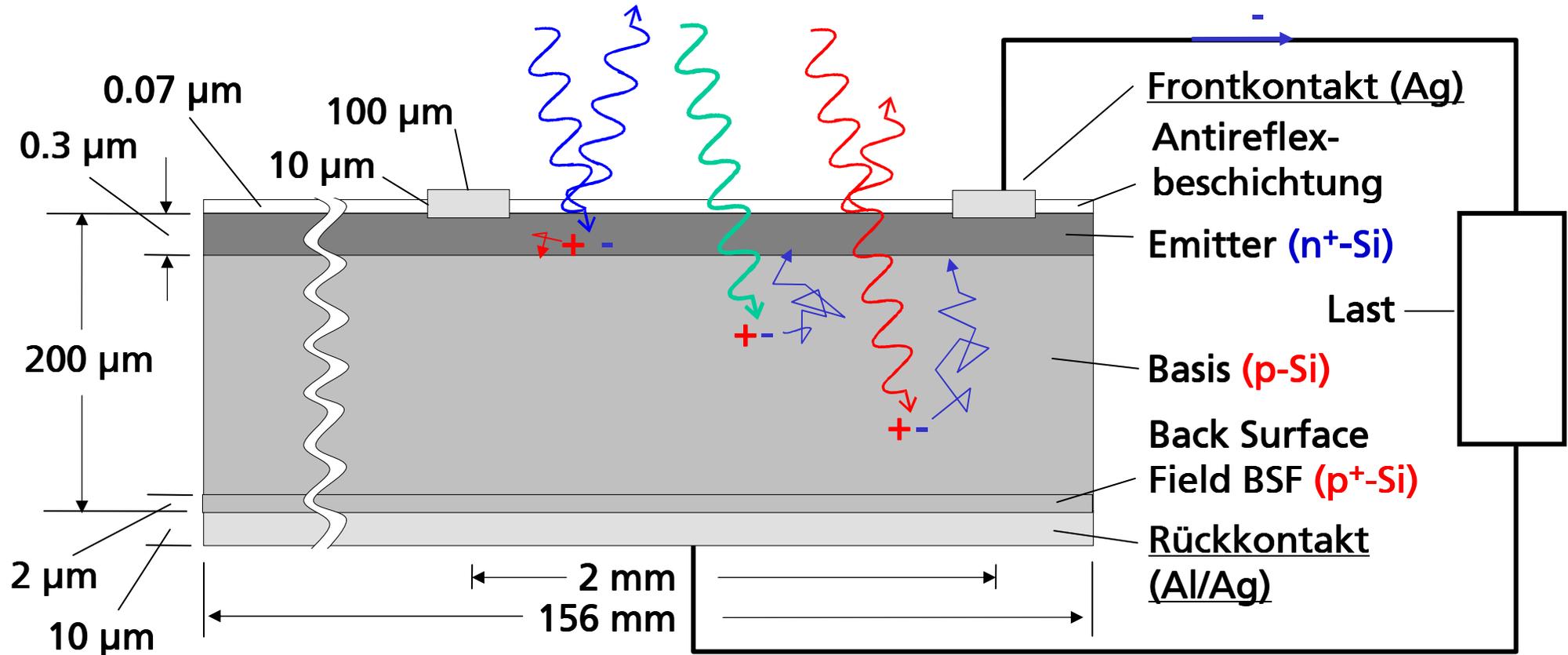
Übersicht

- Einleitung (Marktentwicklung, Standardzellstruktur, Verlustmechanismen / Wirkungsgradgrenzen)
- Höchsteffiziente einkristalline Silizium-Laborzellen
- Höchsteffiziente multikristalline Si-Laborzellen
- Neueste Ergebnisse aus der Industrie
- Zusammenfassung und Ausblick

PV Markets

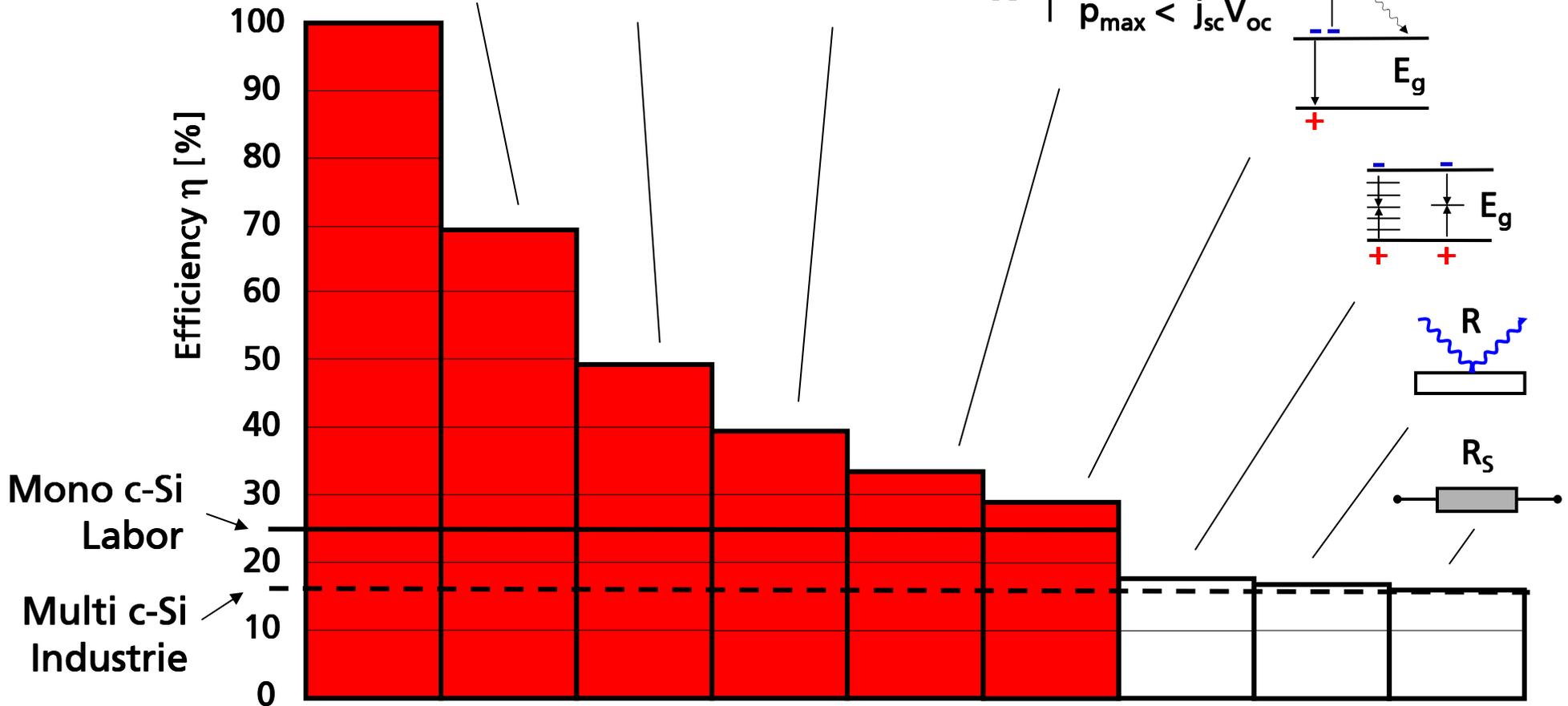
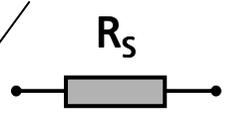
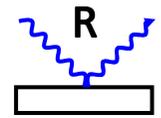
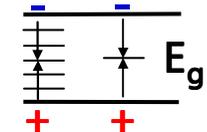
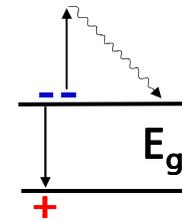
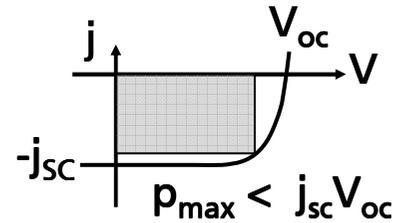
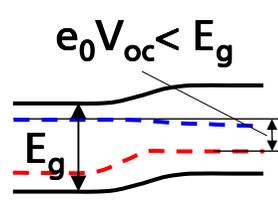
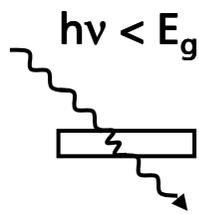
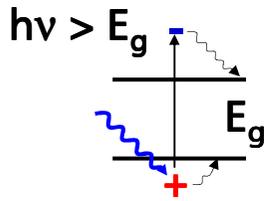


Aufbau einer kristallinen Silizium Standard-Solarzelle

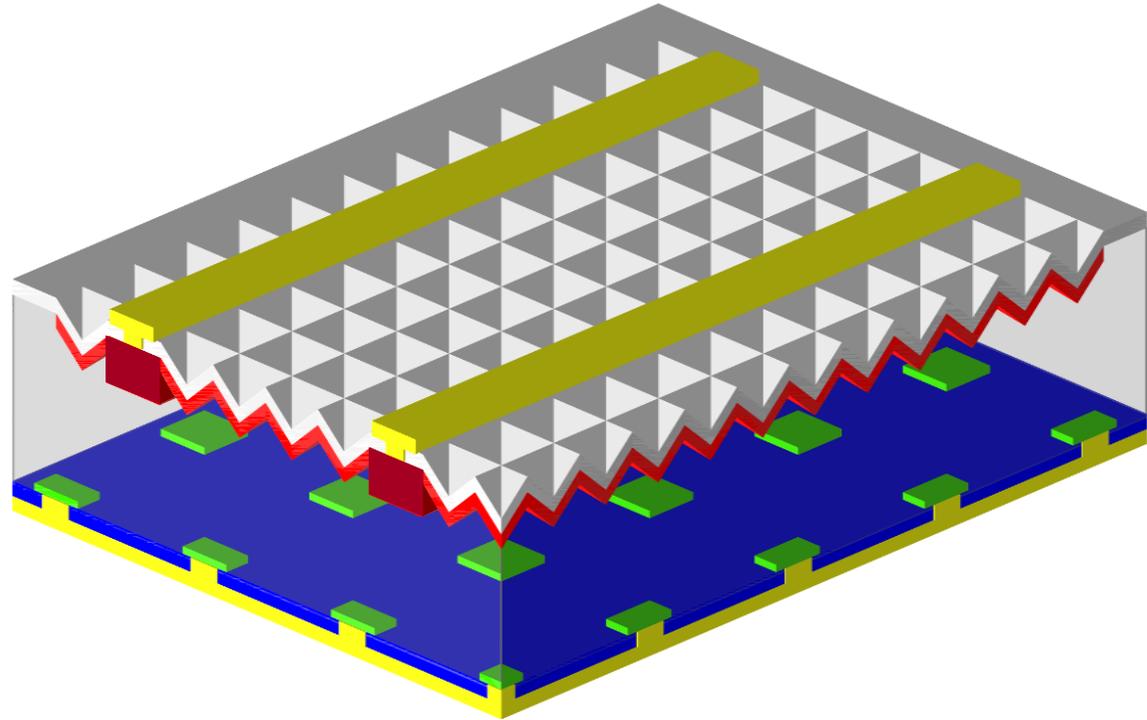


Solarzellenverlustmechanismen

$$\eta = \frac{p_{\max}}{\phi_{\text{illum}}}$$

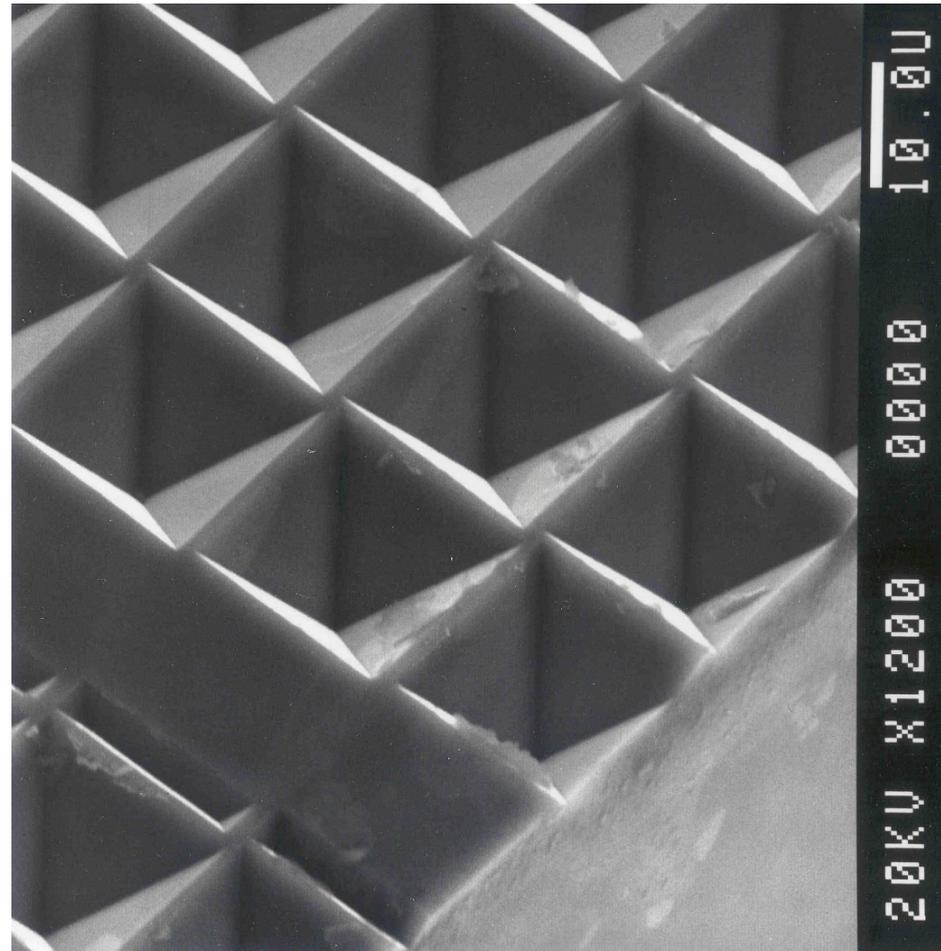
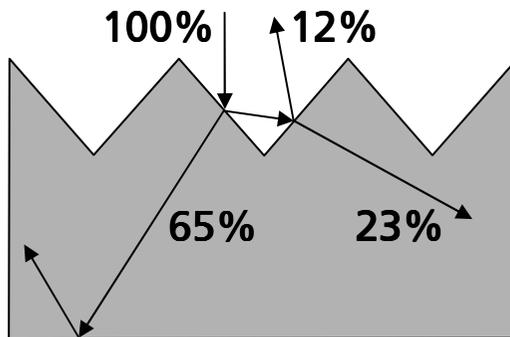


Höchsteffiziente einkristalline Silizium-Laborzellen



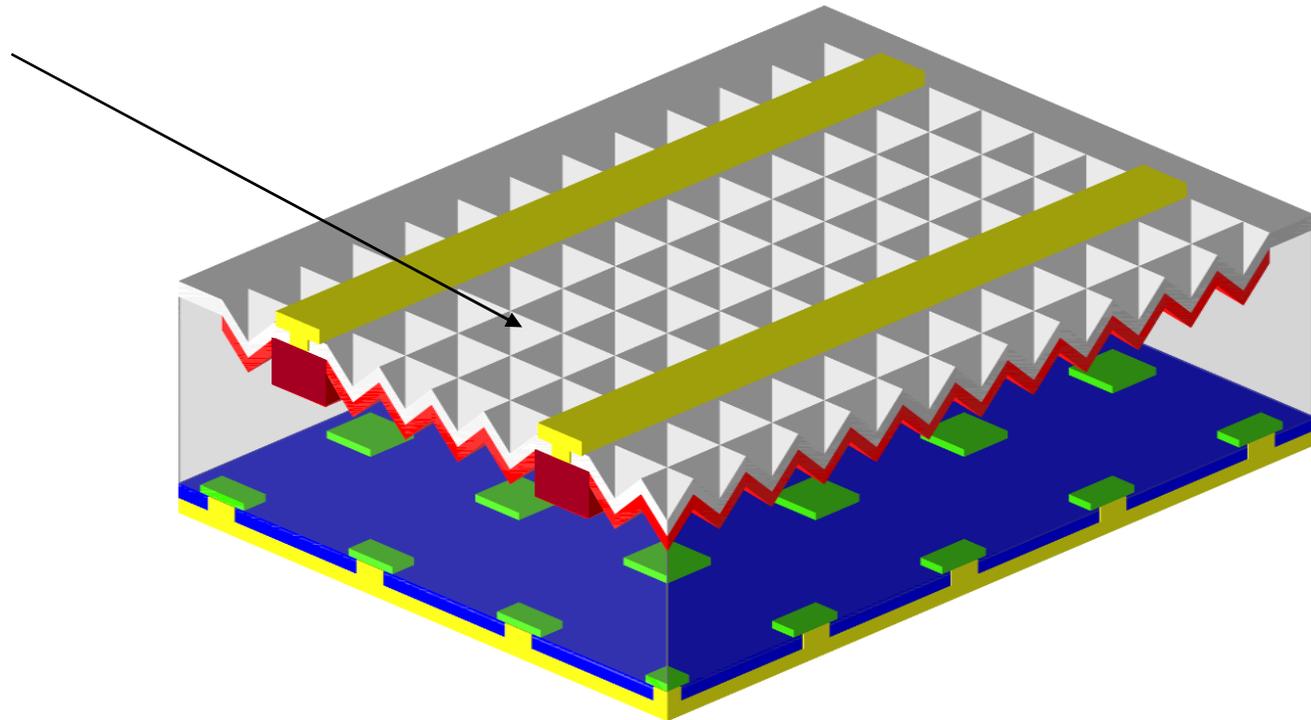
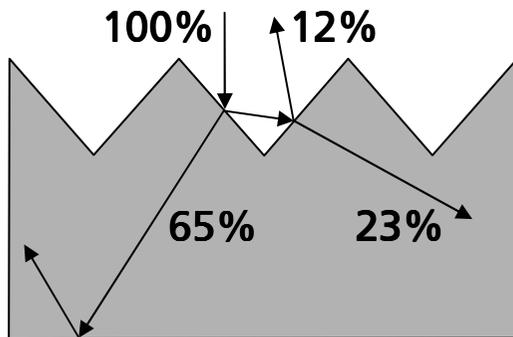
Höchsteffiziente einkristalline Silizium-Laborzellen

Invertierte Pyramiden:
gute Lichteinkopplung,
gutes „light trapping“



Höchsteffiziente einkristalline Silizium-Laborzellen

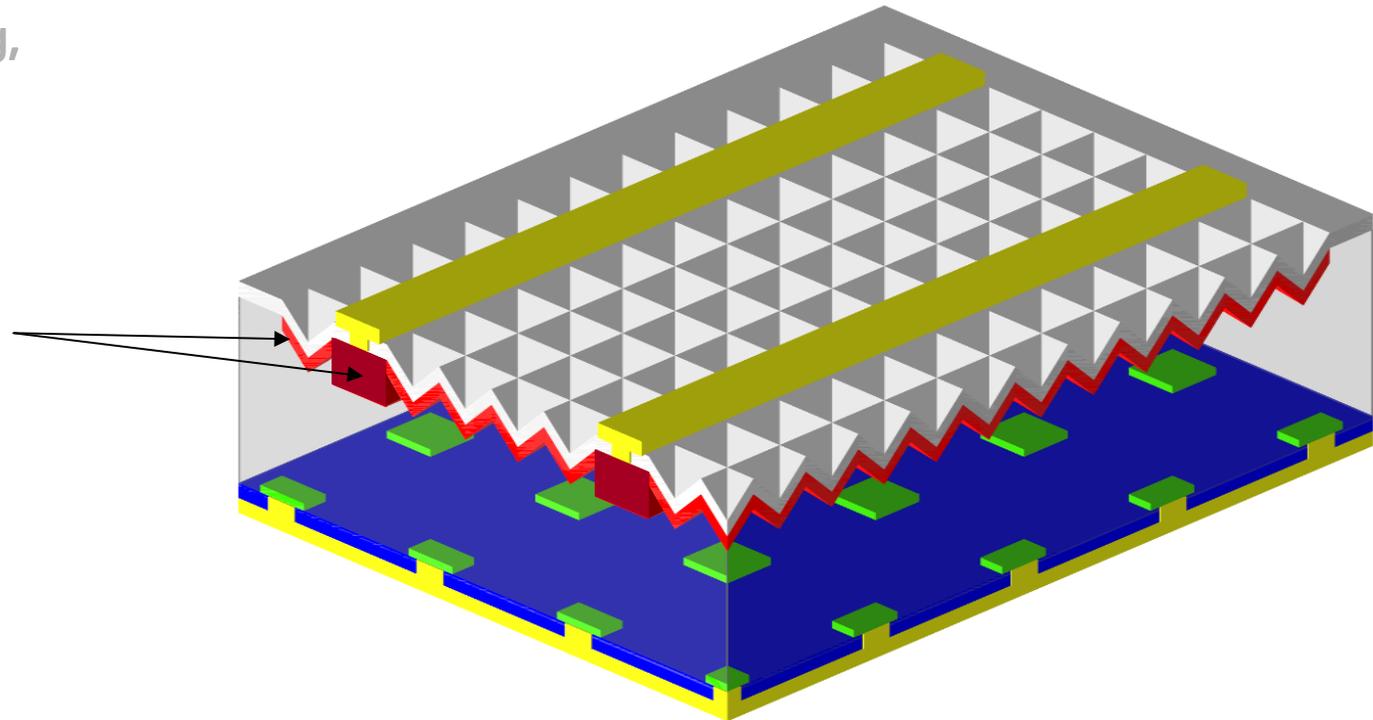
Invertierte Pyramiden:
gute Lichteinkopplung,
gutes „light trapping“



Höchsteffiziente einkristalline Silizium-Laborzellen

Invertierte Pyramiden:
gute Lichteinkopplung,
gutes „light trapping“

Selektiver Emitter:
kleiner Kontaktwider-
stand, hohe Blauem-
pfindlichkeit

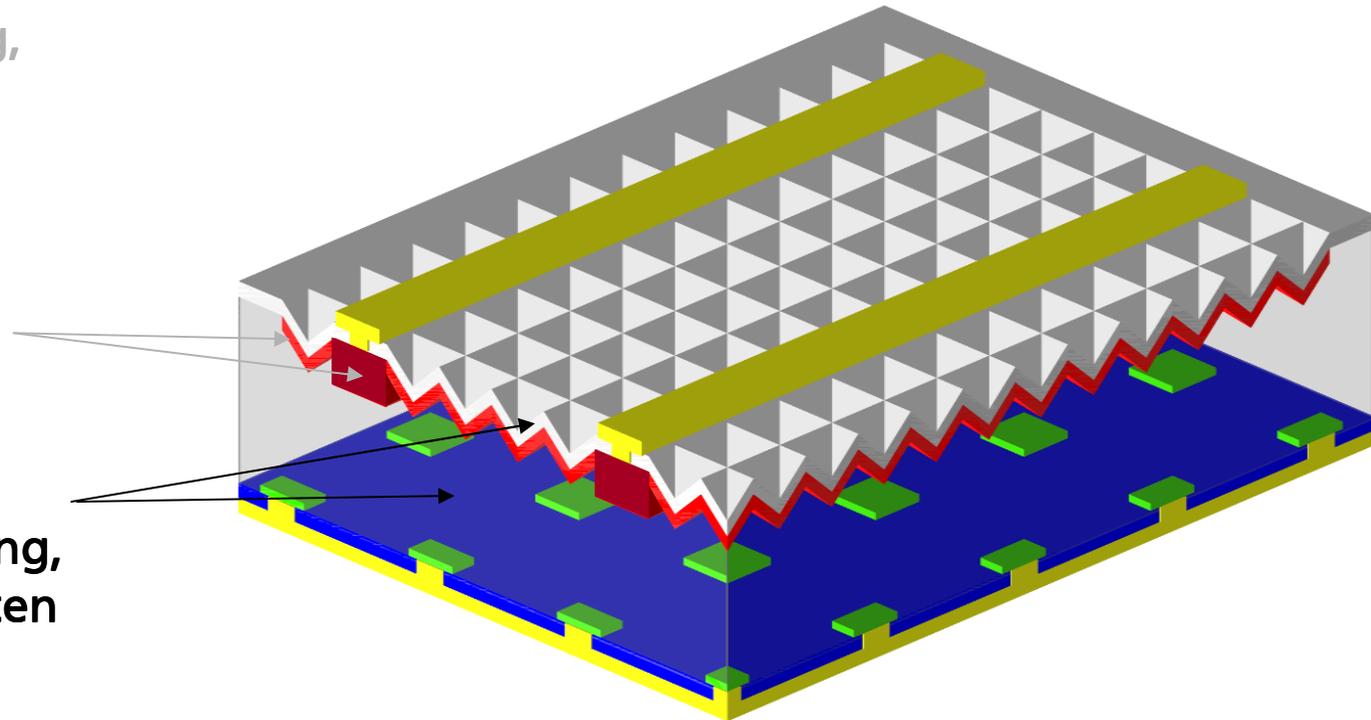


Höchsteffiziente einkristalline Silizium-Laborzellen

Invertierte Pyramiden:
gute Lichteinkopplung,
gutes „light trapping“

Selektiver Emitter:
kleiner Kontaktwider-
stand, hohe Blauem-
pfindlichkeit

Thermisches Oxid:
Oberflächenpassivierung,
hohe Reflektivität hinten



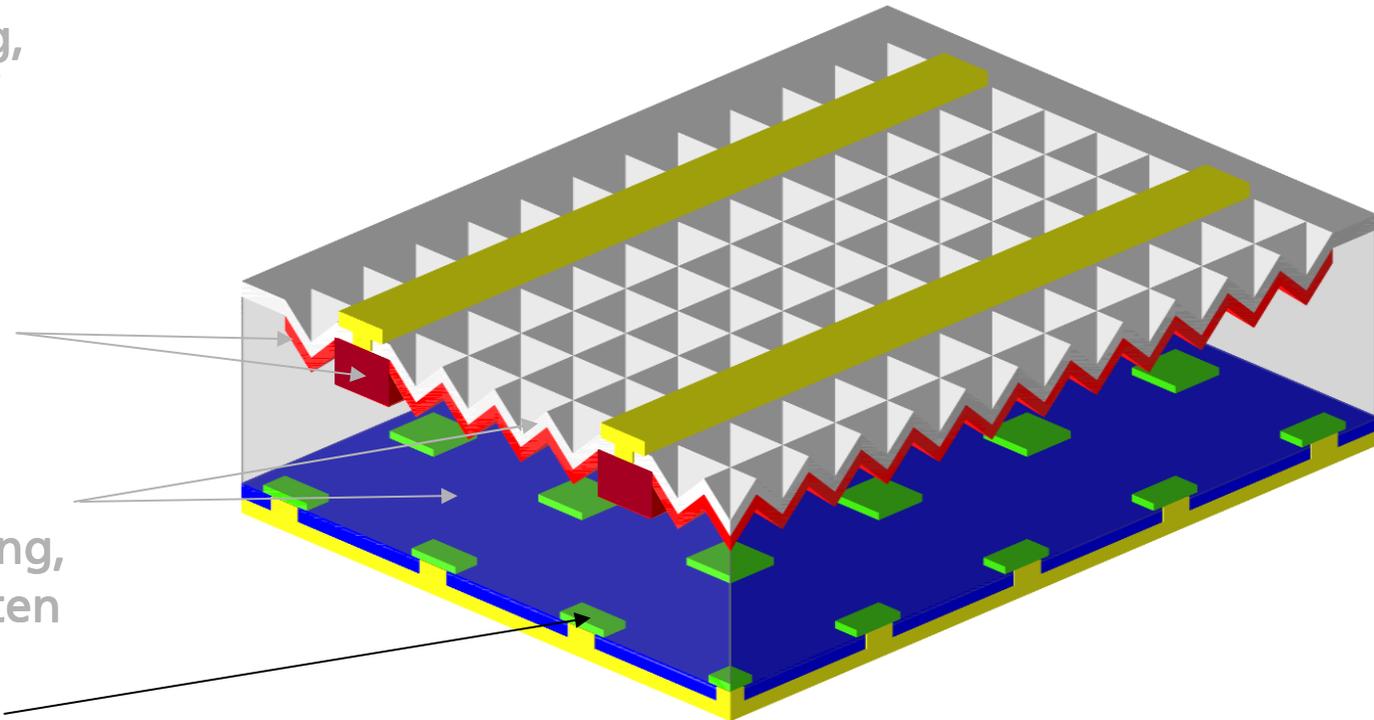
Höchsteffiziente einkristalline Silizium-Laborzellen

Invertierte Pyramiden:
gute Lichteinkopplung,
gutes „light trapping“

Selektiver Emitter:
kleiner Kontaktwider-
stand, hohe Blauem-
pfindlichkeit

Thermisches Oxid:
Oberflächenpassivierung,
hohe Reflektivität hinten

Lokale Bordiffusion:
kleiner Kontaktwider-
stand, hohes V_{oc}



Höchsteffiziente einkristalline Silizium-Laborzellen

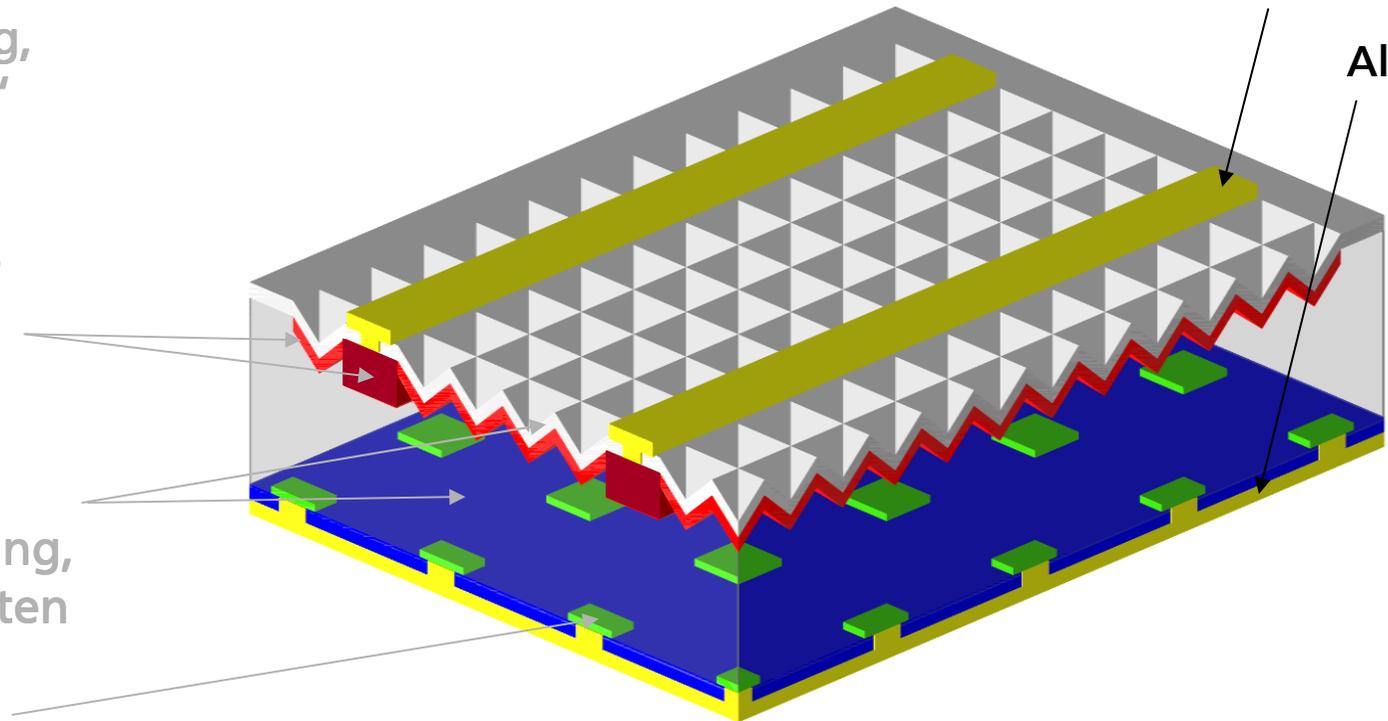
Metallisierung: Ti/Pd/Ag + Ag-Galvanik

Invertierte Pyramiden:
gute Lichteinkopplung,
gutes „light trapping“

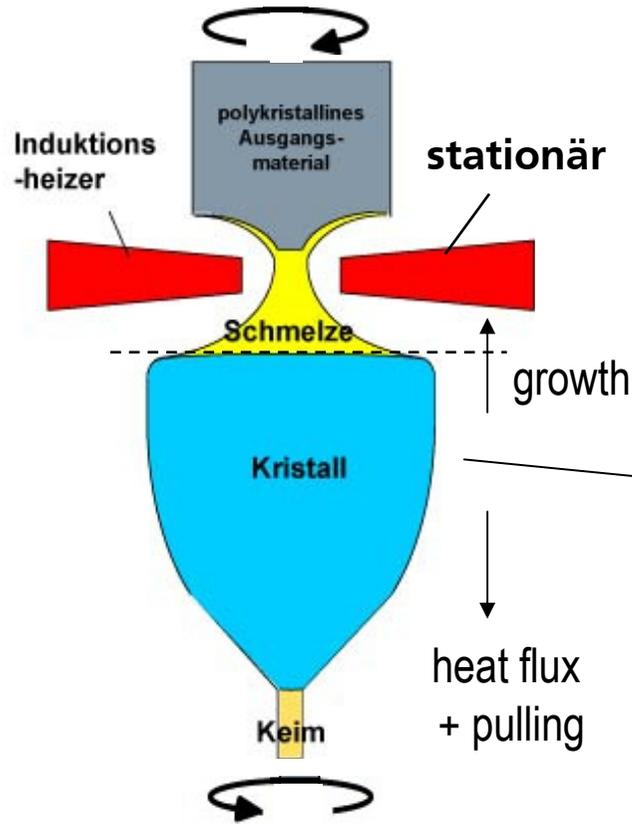
Selektiver Emitter:
kleiner Kontaktwider-
stand, hohe Blauem-
pfindlichkeit

Thermisches Oxid:
Oberflächenpassivierung,
hohe Reflektivität hinten

Lokale Borddiffusion:
kleiner Kontaktwider-
stand, hohes V_{oc}

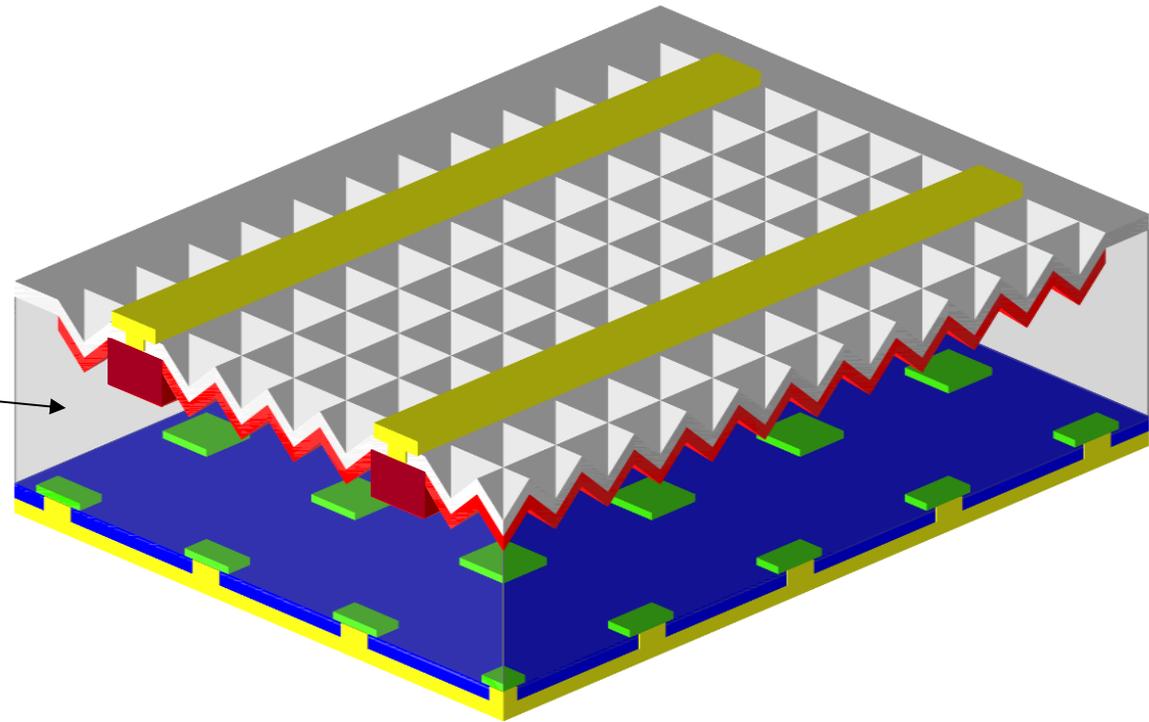


Höchsteffiziente einkristalline Silizium-Laborzellen



Floating Zone (FZ)

Quelle: T. Bähr, Access, 2007

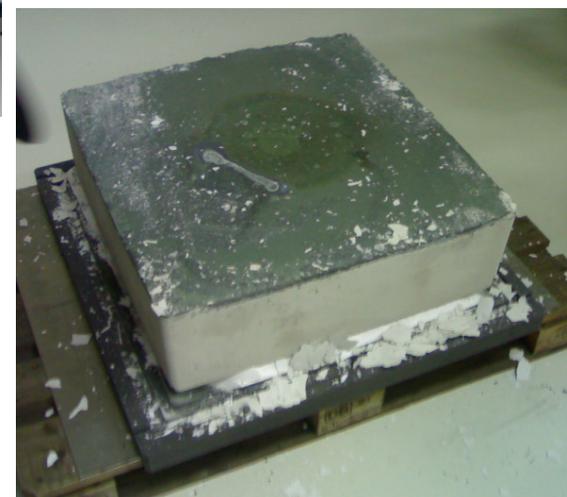
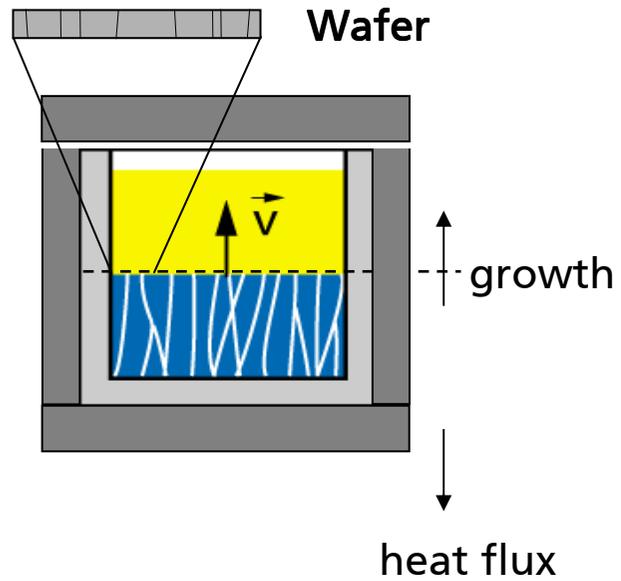


$$\tau_b \geq 1000 \mu\text{s}$$



$$\eta = 23 - 25 \%$$

Multikristalline Silizium-Blockkristallisation

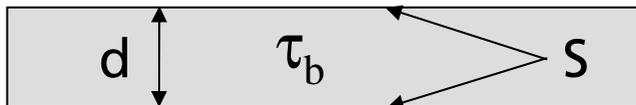


Blockkristallisation

Quelle: T. Bähr, Access, 2007

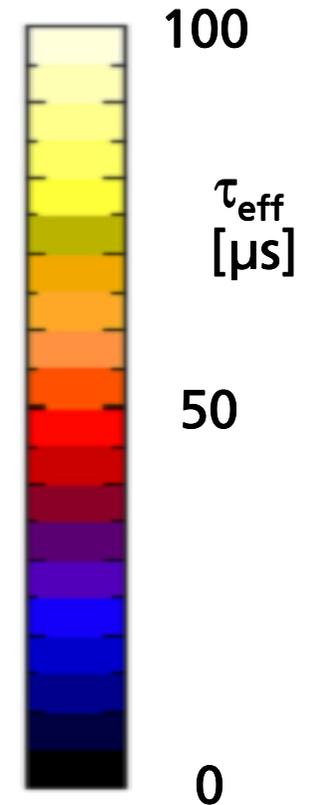
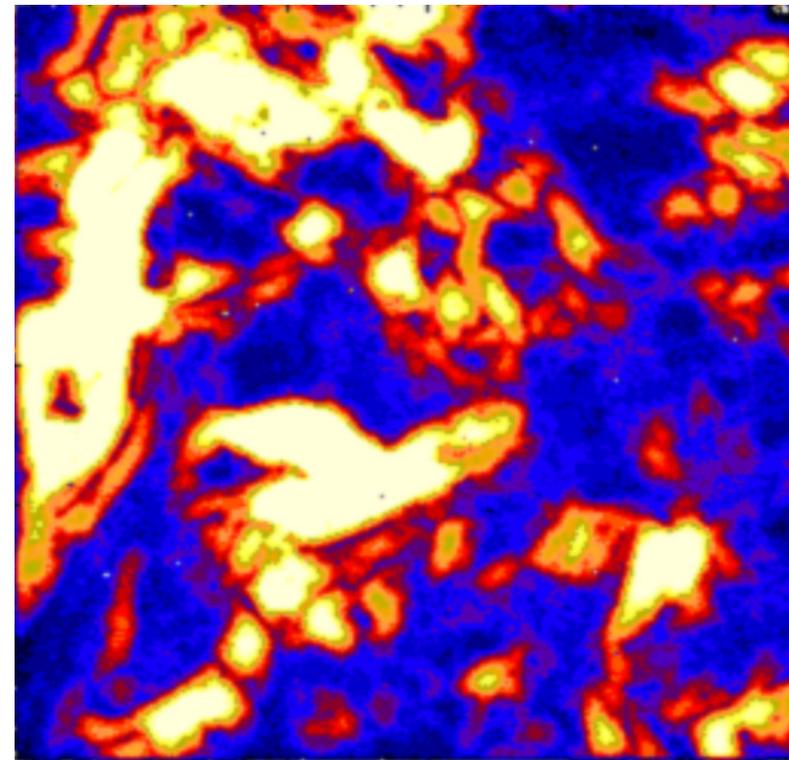
Ladungsträgerlebensdauer in multikristallinem Silizium

- Ladungsträgerlebensdauer τ_{eff} ist inhomogen verteilt



$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{2S}{d}$$

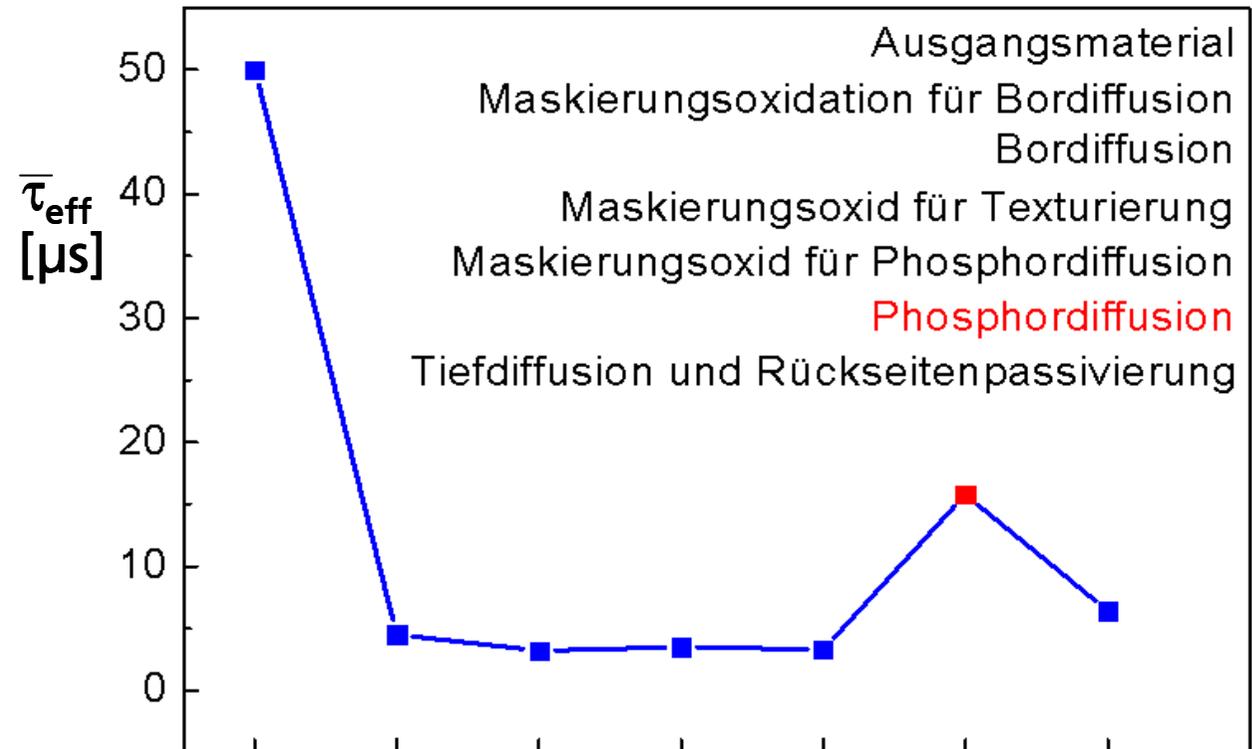
- Mittelwerte: $\bar{\tau}_{\text{eff}} = 40 - 80 \mu\text{s}$ für gutes Material
- Ladungsträgerlebensdauer ist Schlüsselparameter für multikristallines Silicium



Höchsteffizienz-Einkristallprozess bei multikristallinem Si

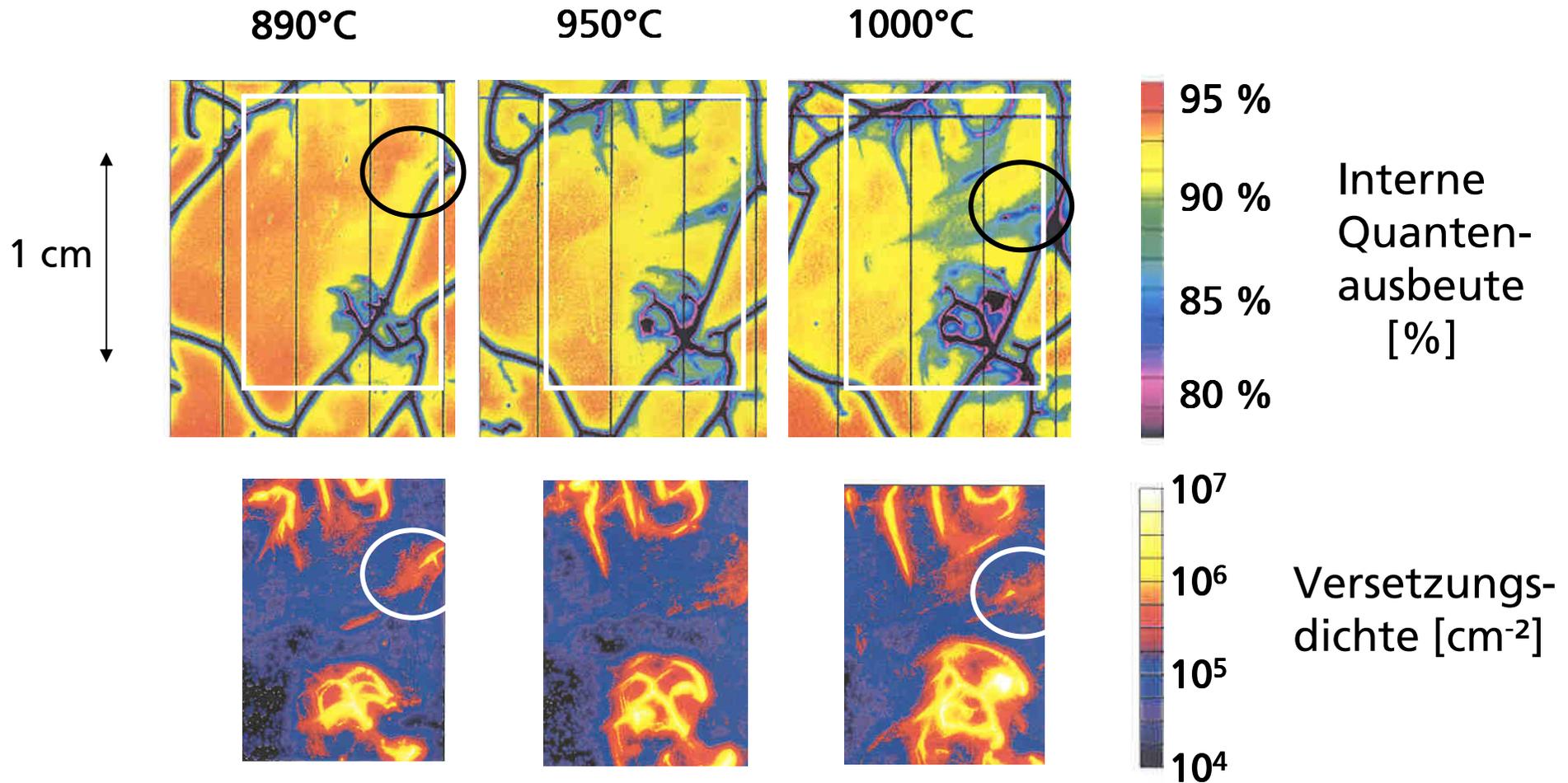
Üblicherweise werden viele Hochtemperaturprozesse für die Herstellung höchsteffizienter Solarzellen benutzt

Aber:
Hohe Temperaturen (> 900°C) schädigen multikristallines Silicium !

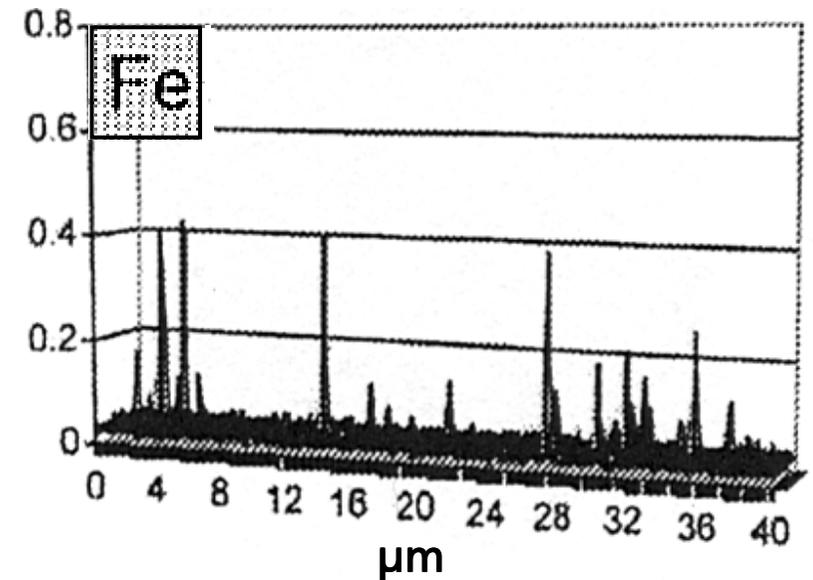
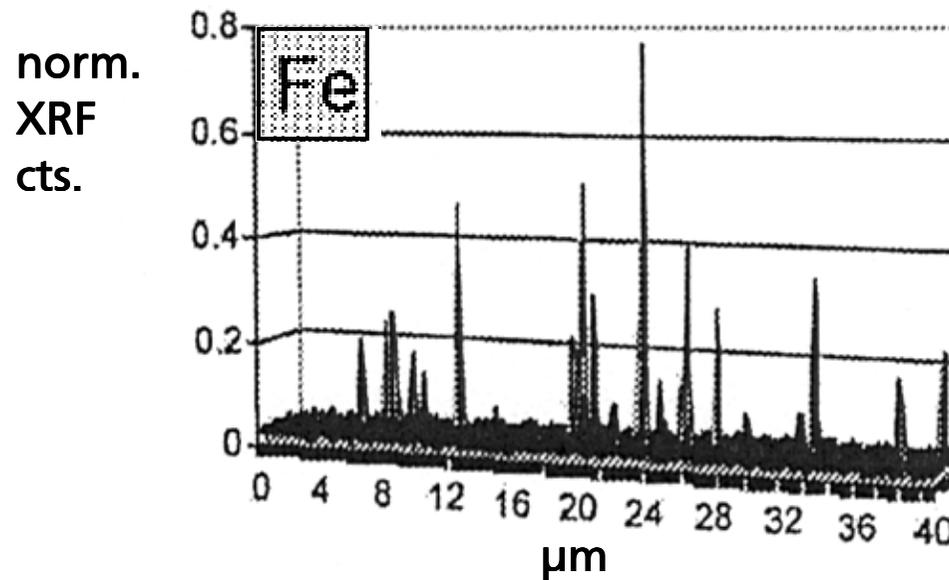


Standard-Prozessablauf für hocheffiziente Solarzellen

Hochtemperaturprozesse bei multikristallinem Silizium



Eisensilizidpräzipitate in multikristallinem Silizium



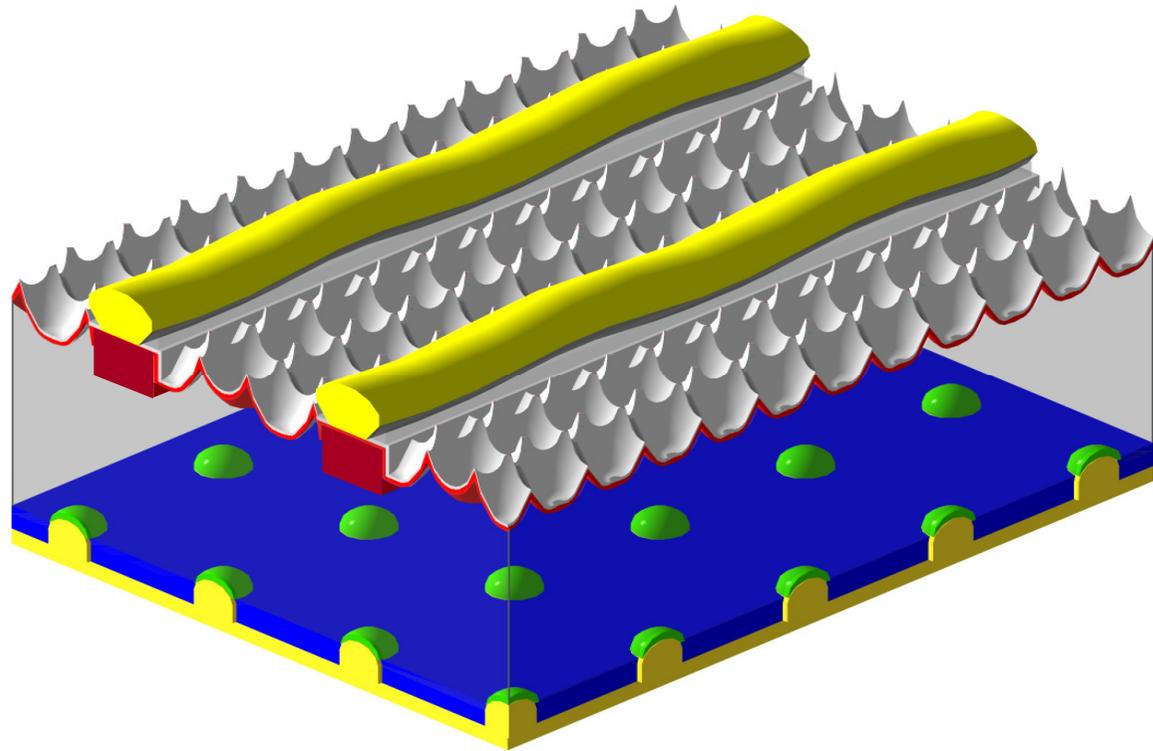
+ EXAFS -> FeSi_2
- Nachweisgrenze 16nm

as grown

RTP (1000°C, 20 sec)

Quelle: T. Buonassisi, Uni Berkeley, 2004

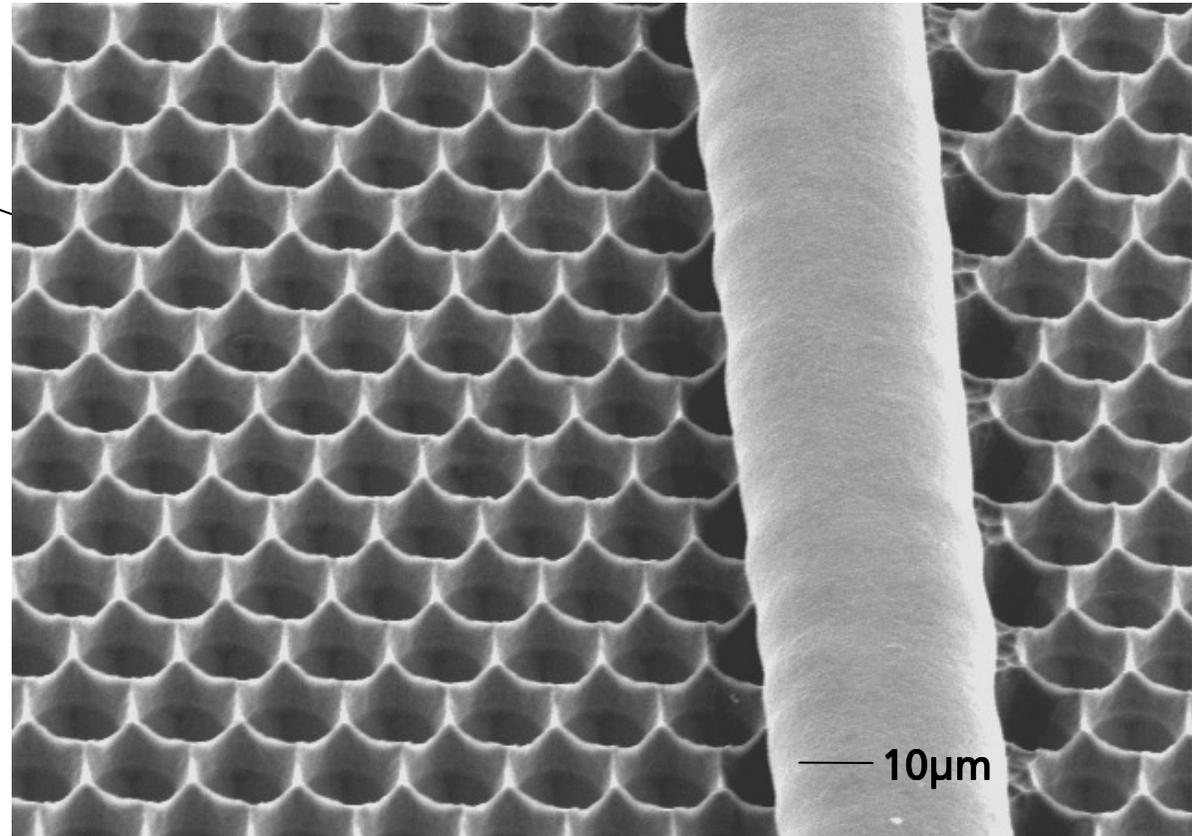
Höchsteffiziente multikristalline Silizium-Laborzellen



Höchsteffiziente multikristalline Silizium-Laborzellen

Plasmatextur:

gute Lichteinkopplung,
gutes „light trapping“



Höchsteffiziente multikristalline Silizium-Laborzellen

Plasmatextur:

gute Lichteinkopplung,
gutes „light trapping“

Selektiver Emittor:

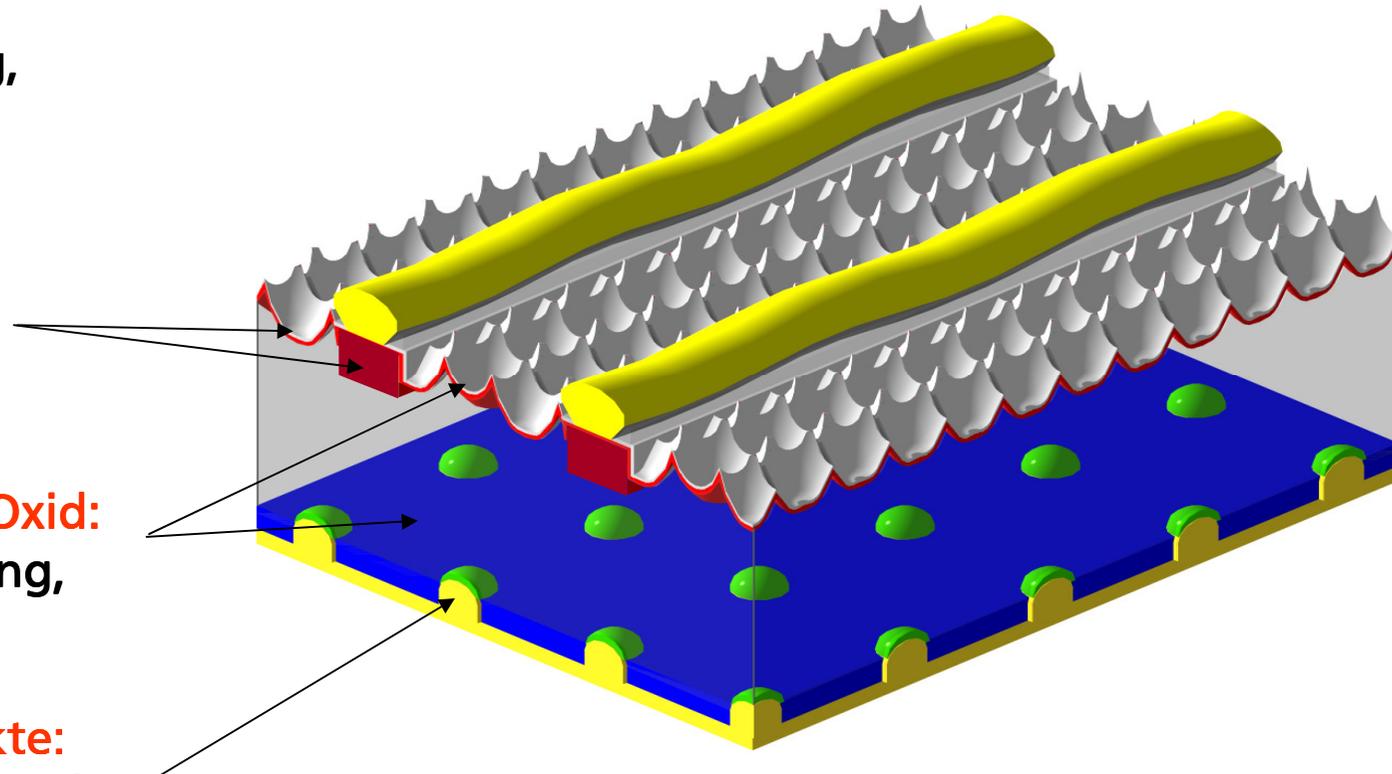
kleiner Kontaktwider-
stand, hohe Blauem-
pfindlichkeit

Feuchtes thermisches Oxid:

Oberflächenpassivierung,
hohe Reflektivität

Lasergefeuerte Kontakte:

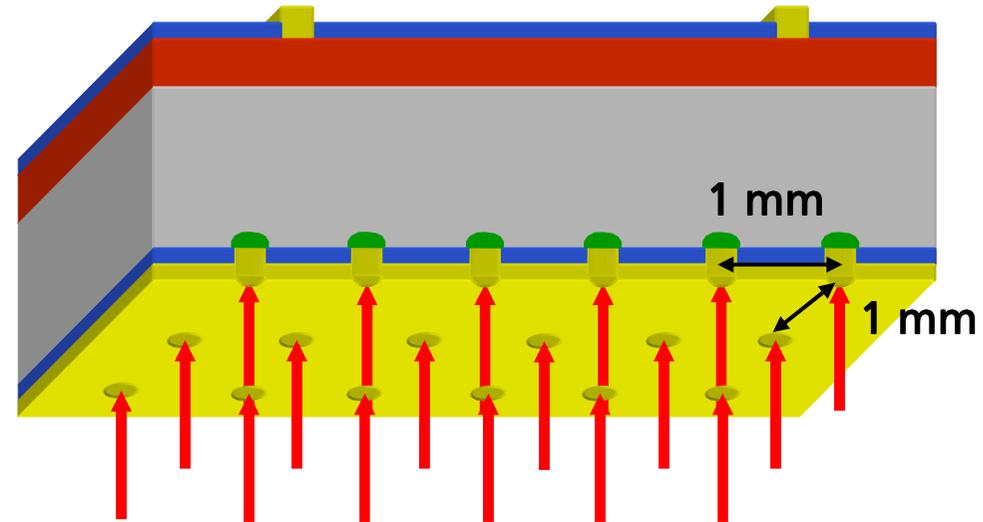
lokales BSF, kleiner Kontakt-
widerstand, großes V_{oc}



Der Laser-gefeuerte Rückkontakt (Laser Fired Contact LFC)

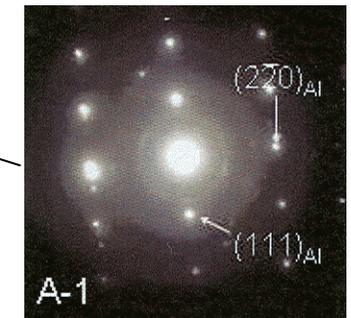
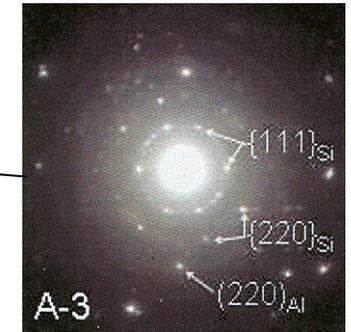
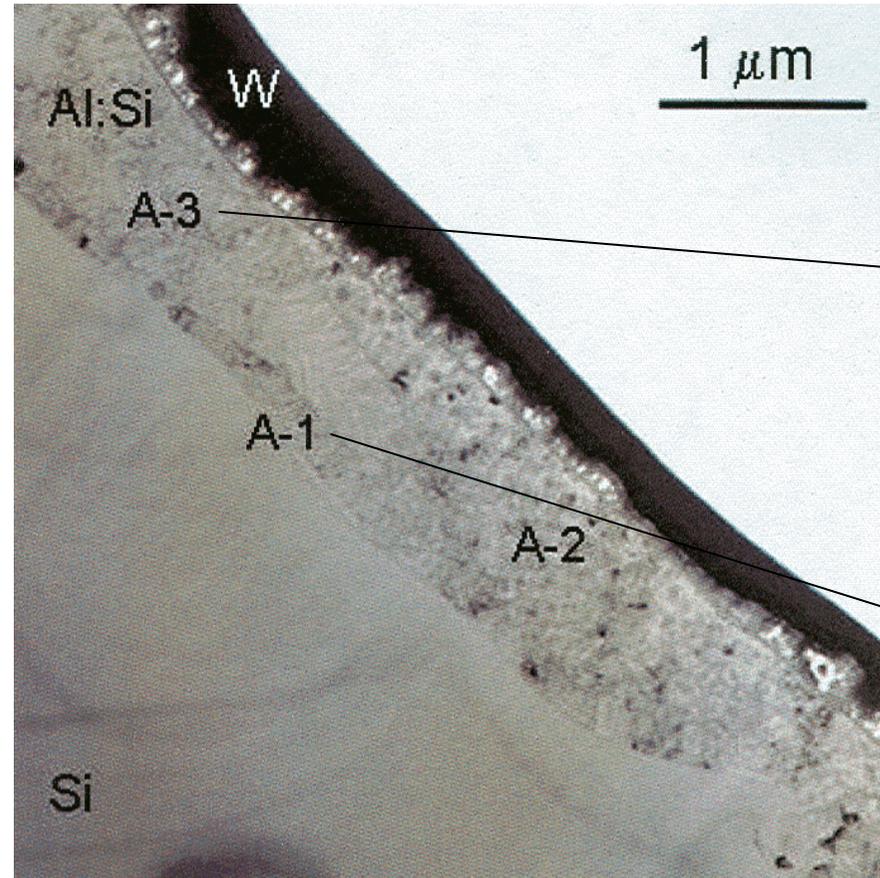
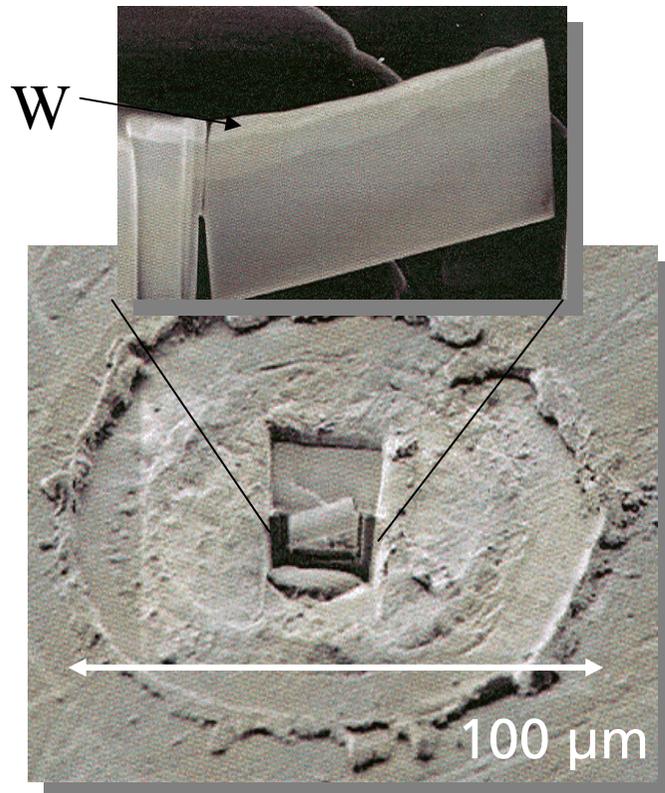
Der ideale Rückkontakt
in 3 einfachen
Tiefentemperaturschritten:

1. Passivierung (SiO_2 , Si:H, SiN:H, SiC:H, ...)
2. Metallisierung (Al)
3. Laser-feuern von Punktkontakten



- Patentierte und lizenziert
- Dr. Meyer-Struckmann-Wissenschaftspreis 2003 der Brandenburg-Technischen Universität (BTU) Cottbus

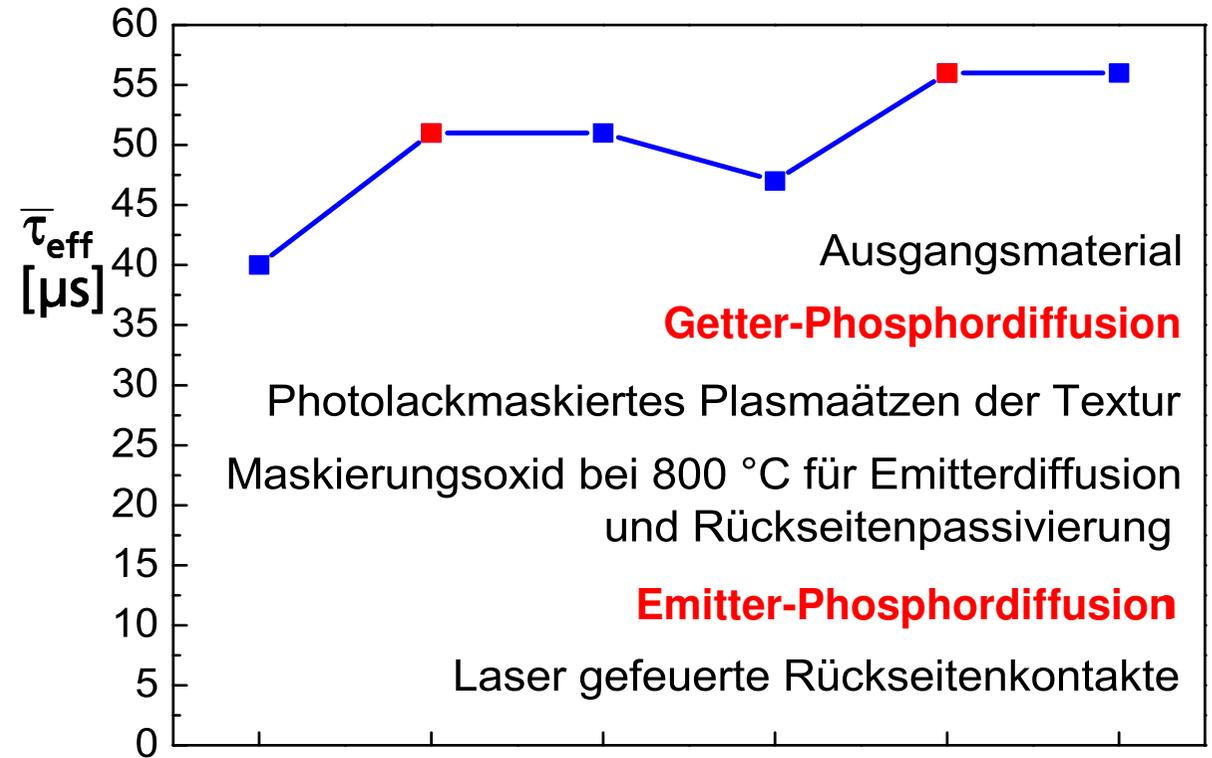
FIB-Aufnahmen eines LFC-Punktkontaktes



Quelle: T. Brammer, FZ Jülich, 2004

Höchstleistungsprozess für multikristallines Silizium

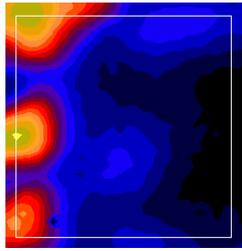
- Reduzierung der Oxidations-temperaturen von 1050°C auf 800°C (feuchtes Oxid)
- Reduzierung der Prozessschritte
- Ergebnis: Verbesserte Materialqualität nach Solarzellenprozess



Neuer Prozessablauf für multikristalline Solarzellen

Modellierung von Lebensdauererverteilungen

τ_{eff} -Messung (CDI)
benachbarter Wafer



1 cm

L_{eff} -Verteilung

$$\longrightarrow L_{\text{eff},j} = \sqrt{D \cdot \tau_{\text{eff},j}}$$

J_0 -Verteilung

$$\longrightarrow J_{0j} = e_0 \cdot n_i^2 \cdot \left(\frac{D}{L_{\text{eff},j} \cdot N_A} \right)$$

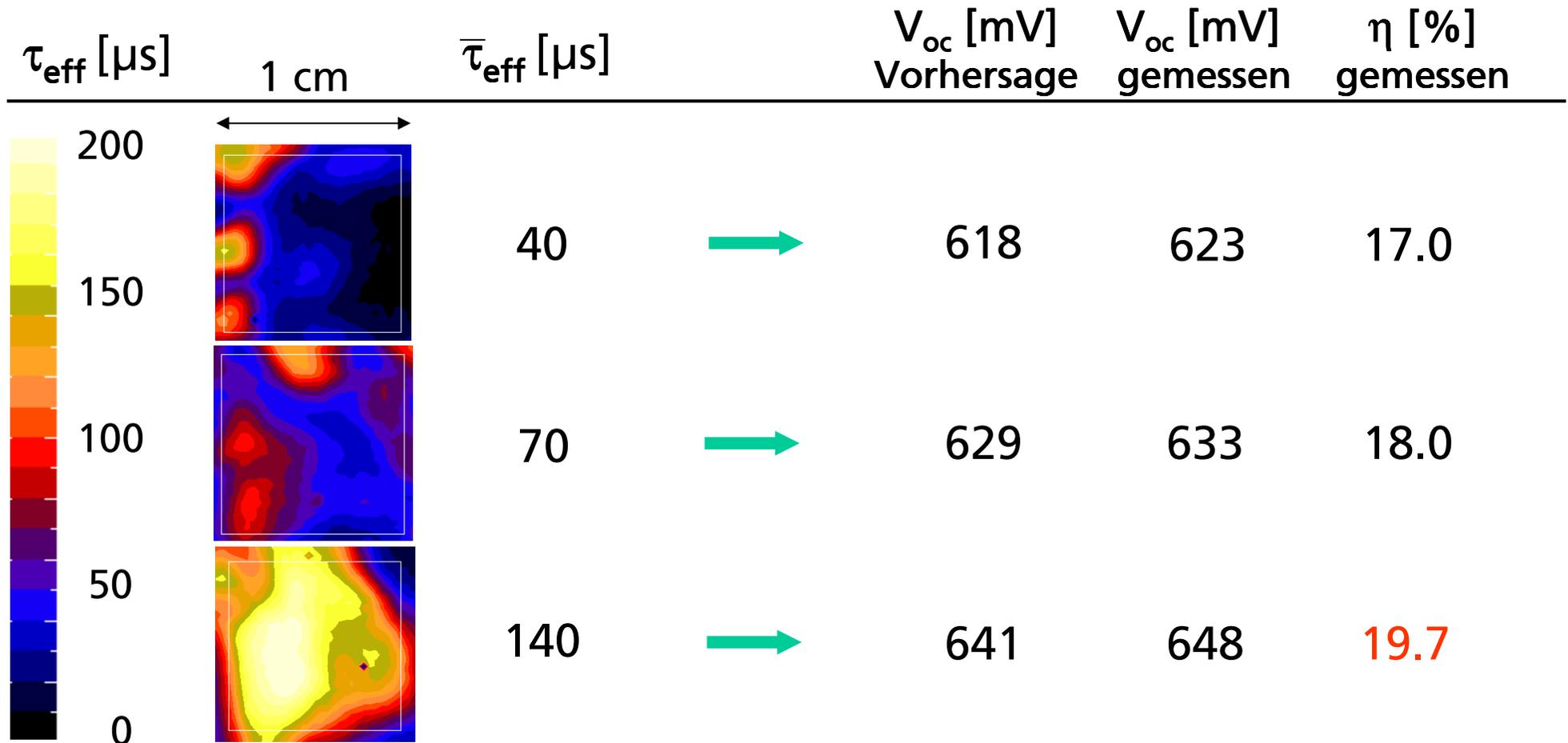
Arithmetische Mittelung von J_0

$$\longrightarrow J_0 = \frac{\sum_{j=1}^N J_{0j}}{N}$$

Vorhersage von V_{oc}

$$\longrightarrow V_{\text{oc}} = \frac{kT}{e_0} \cdot \ln \left(\frac{J_{\text{sc}}}{J_0} + 1 \right)$$

Modellierung von Lebensdauererverteilungen



Beste Zellergebnisse bei multikristallinem Silizium

A = 1 cm², feuchtes Oxid

Material	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	η [%]	d [μm]
FZ, 1 Ωcm	660	39.8	80.7	21.2	250
mc, 1.8 Ωcm	648	38.5	78.8	19.7*	218
mc, 0.6 Ωcm	653	38.8	78.6	19.9*	218
mc, 0.6 Ωcm	664	37.7	80.9	20.3 ⁺	99

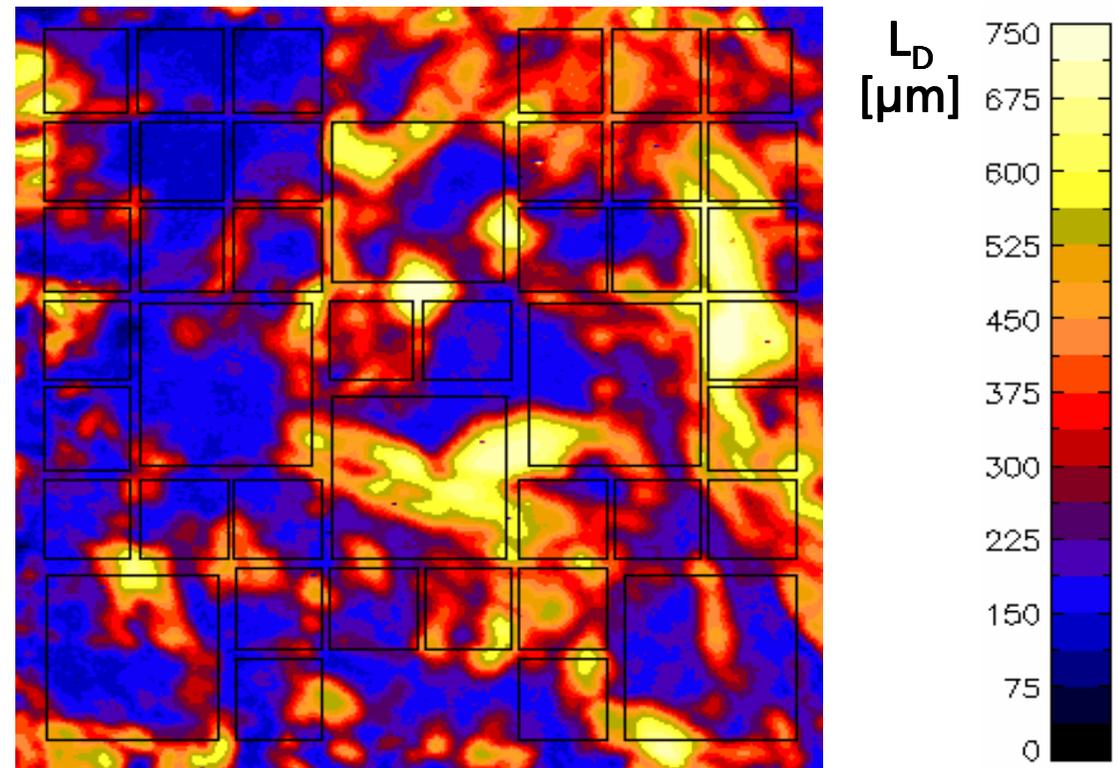
* unabhängige Messung im Fraunhofer ISE CaLab

⁺ unabhängige Messung am NREL, USA, 2004,
neues Spektrum 2009 -> η = 20.4%

Prozessieren von Testzellen



10 x 10 cm² Wafer mit 1 x 1 cm²
und 2 x 2 cm² Testsolarzellstrukturen



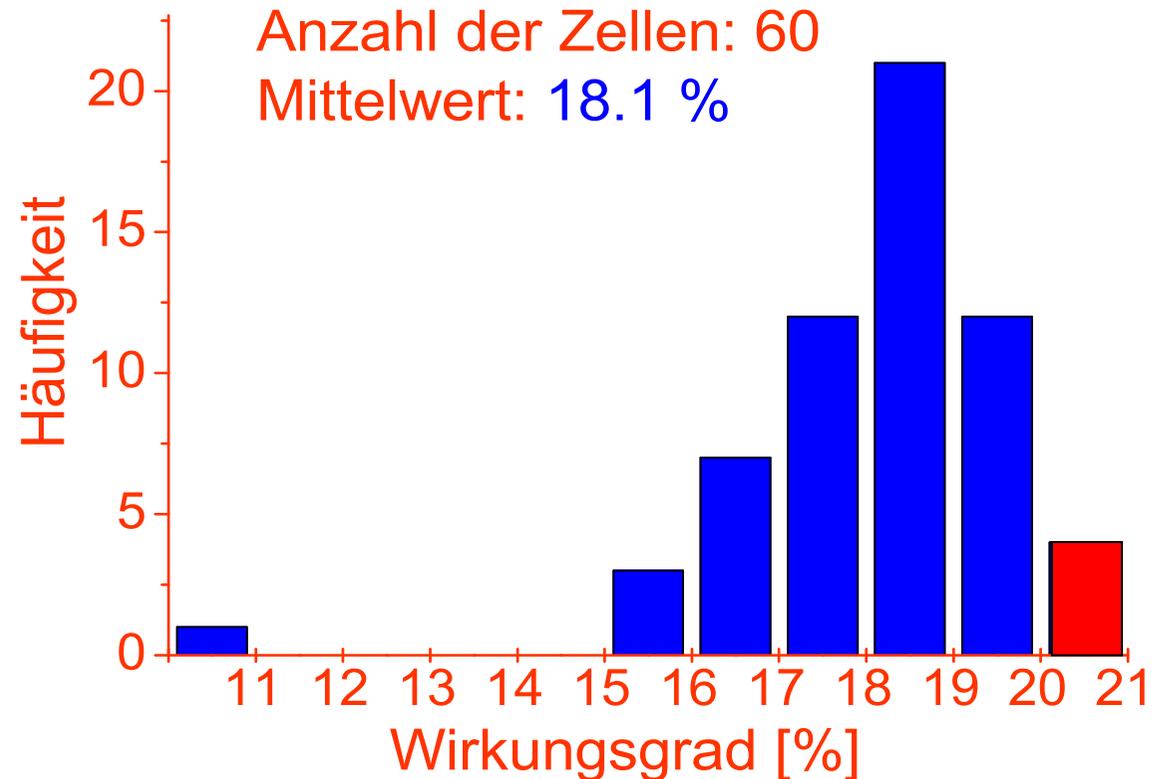
Diffusionslängentopographie nach P-Gettern

Wirkungsgradverteilung von 60 Zellen auf 2 Wafern

Mittlerer Wirkungsgrad
von **18.1 %** !



Die entwickelte
Solarzellenstruktur
ermöglicht das Herstellen
von **hocheffizienten
multikristallinen
Siliciumsolarzellen**



Neueste Ergebnisse aus der Industrie (15.6 x 15.6 cm²)

24th EU Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 21-25 Sept. 2009

beste Zelle bestes Modul

- QCells (2010 in Produktion): 17.0 %, 15.9 % (total area)
- Suntech (nahe an Produktion): 17.8 %, 16.5 % (aperture area)
- Mitsubishi Electric (Labor): 19.1 % (!)

Zusammenfassung und Ausblick

- Stürmische Marktentwicklung der Photovoltaik durch weltweite Einführungsprogramme
- Marktführer Multikristallines Silizium (Marktanteil 50%)
- Weltrekordzelle am ISE (1 cm²): 20.4 % Wirkungsgrad
- mc-Silizium hat immer noch ein hohes Entwicklungspotenzial!
- Netzparität in D (20€cent/kWh, d.h. Systempreis von 2 €/Wp, Modulpreis 1.20 €/Wp) in wenigen Jahren erreicht (vor 2015)

Danksagung:

S. Glunz, O. Schultz, J.-C. Goldschmidt, M. Rinio, H.
Kampwerth (Fraunhofer ISE)
A. Buonassisi (Uni Berkeley)

- Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Übersicht Entwicklung Industrieller Modulwirkungsgrad

