

ZAE BAYERN

Photovoltaik - Neuentwicklungen der letzten Jahre

Rolf Brendel

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung

www.zae-bayern.de

Abteilung Thermosensorik und Photovoltaik, Erlangen

Neue Sichtweise auf Altbekanntes

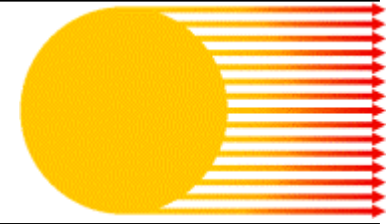
- Wie funktioniert eine Solarzelle?

Neu in den Fabriken

- Automatisierte Massenproduktion von Solarmodulen aus kristallinem Si für das Hausdach

Neu in den Labors

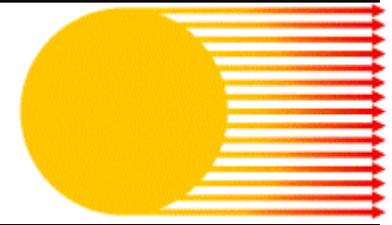
- Sehr dünne kristalline Si-Solarzellen für den Weltraum



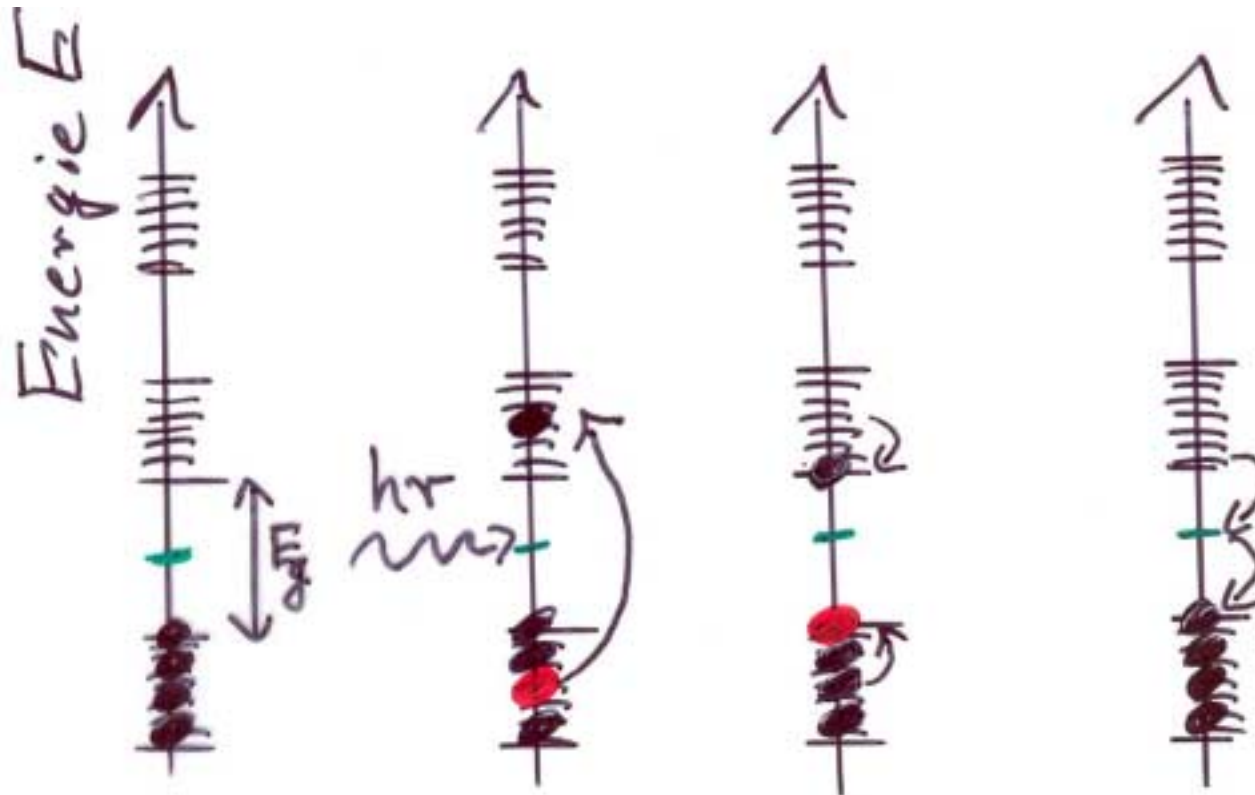
ZAE BAYERN

Wie funktioniert eine Solarzelle?

Energiebänder im Kristall

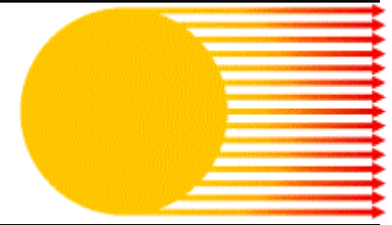


ZAE BAYERN

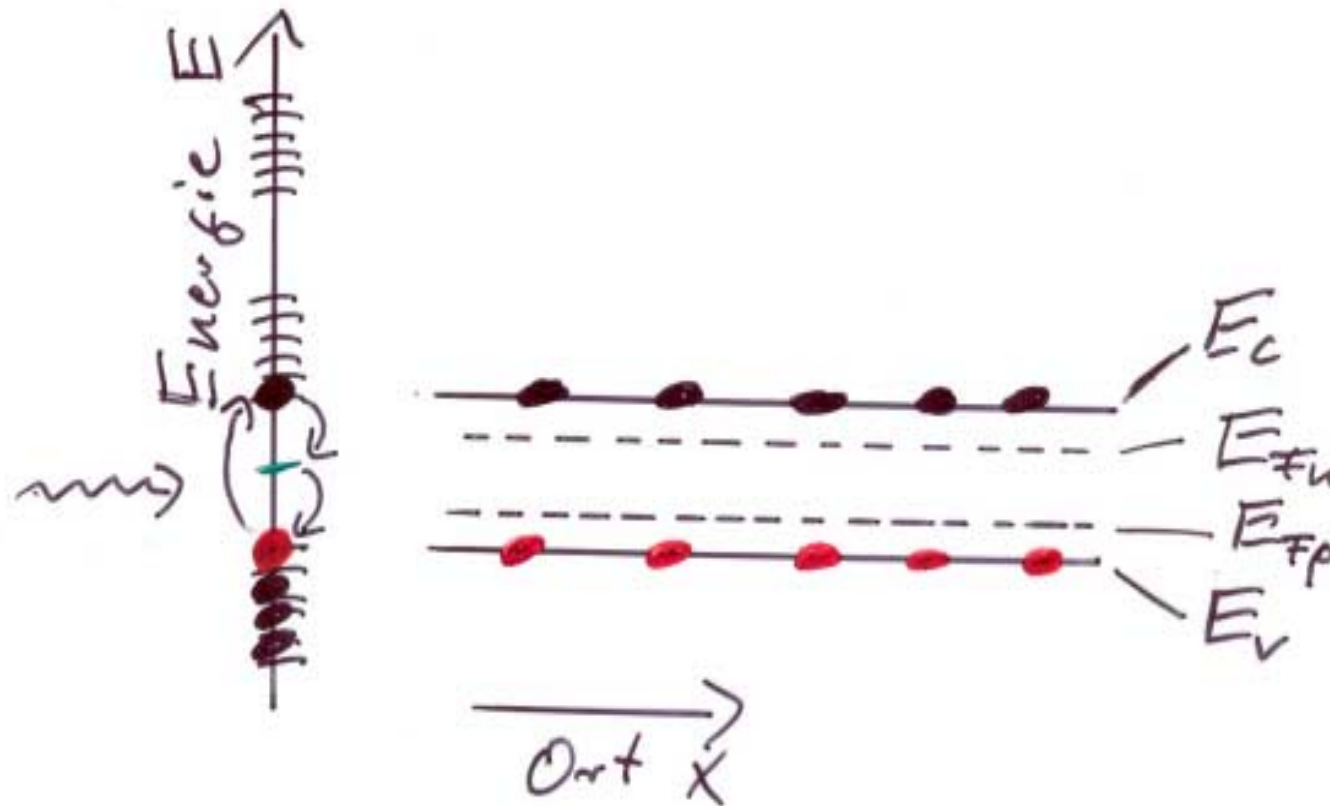


- Verluste:
 - Nichtabsorption von langwelligem Licht
 - Thermalisierung von heißen Ladungsträgern
 - Rekombination

e/h -Paare haben chemische Energie

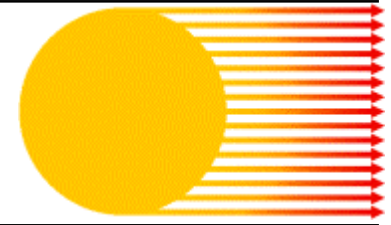


ZAE BAYERN

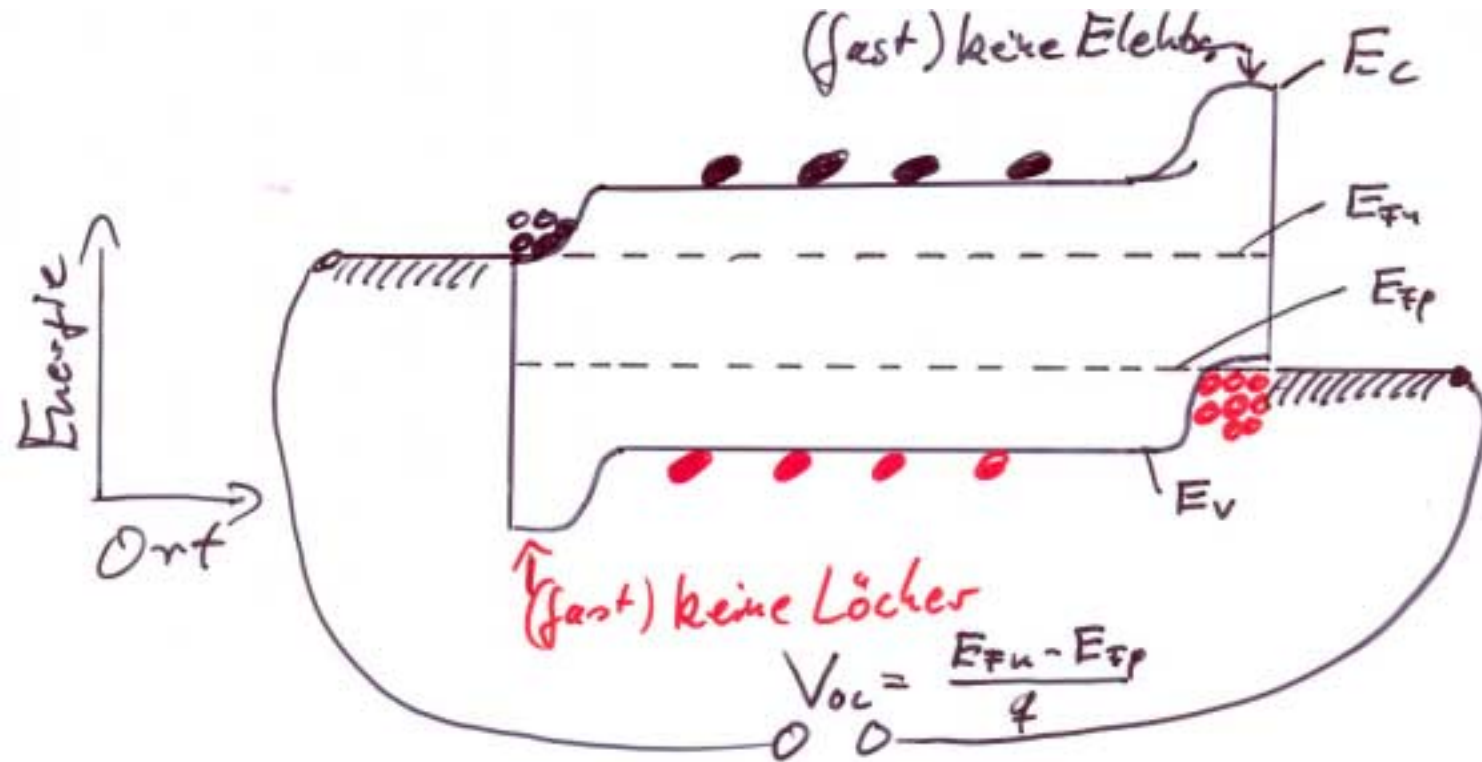


- erhöhte Ladungsträgerkonzentration
- Freie Energie des e/h-Paares ist $E_{Fp} - E_{Fn}$
- dabei ist $E_C - E_{Fn}$ ist Maß für Elektronenkonzentration

Wie lassen wir den Druck im Kessel gewinnbringend ab?

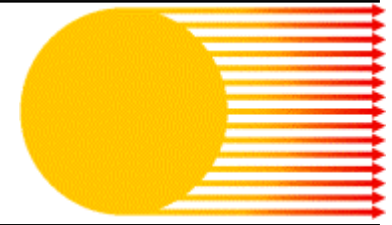


ZAE BAYERN



- Dotieren unter Kontakt hat Ventilfunktion
- Aber: hoher Widerstand in Basis

Dotieren der Basis senkt Serienwiderstand



ZAE BAYERN



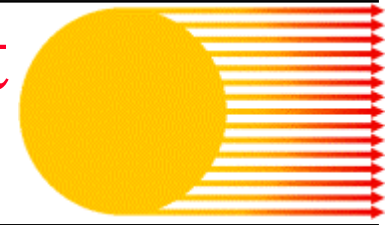
Emitter

Basis

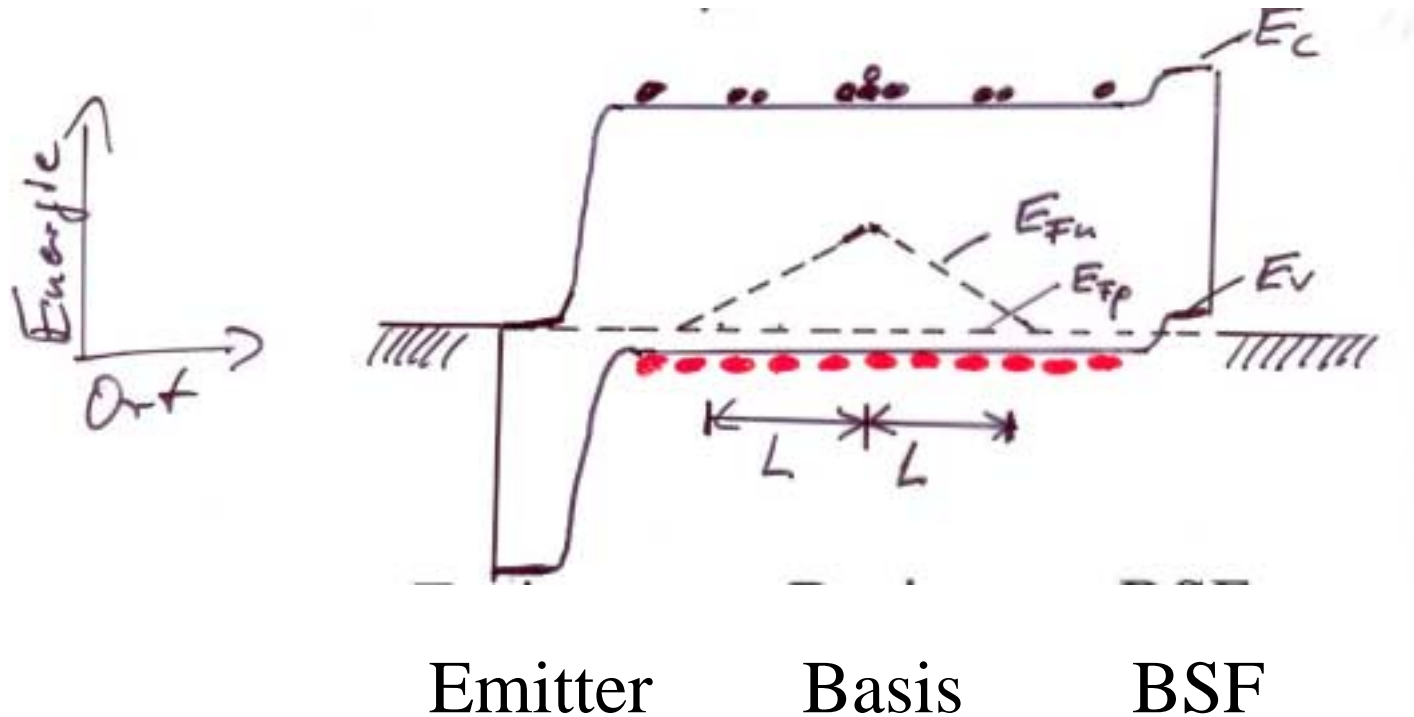
BSF

- Asymmetrie der Metall/Si-Übergänge hat pn-Übergang zur Folge

Zelldicke muß Materialqualität angepasst sein

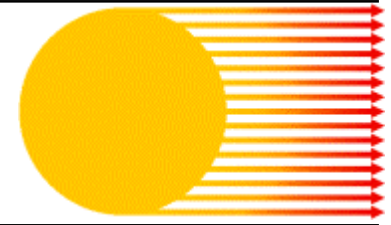


ZAE BAYERN

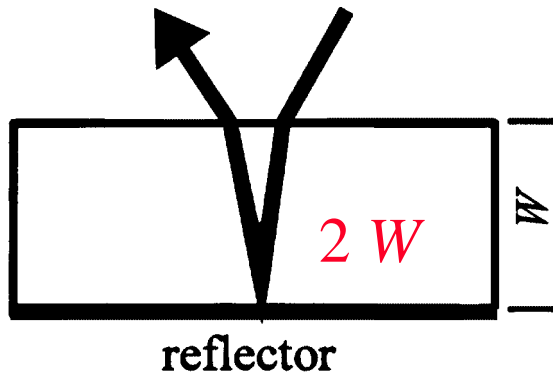


- Transportstrecke $W < \text{Diffusionslänge } L$
- dünne Solarzellen sind günstig

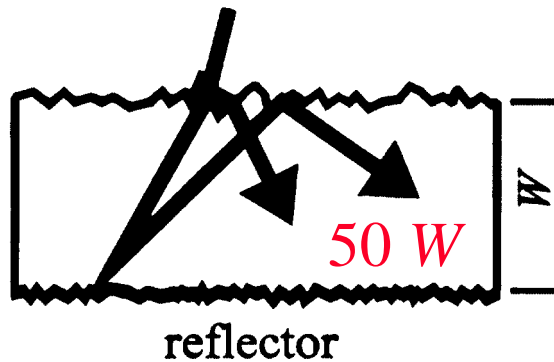
Lichtweg-Verlängerung



ZAE BAYERN



Problem: niedrige Absorption in dünnen Filmen



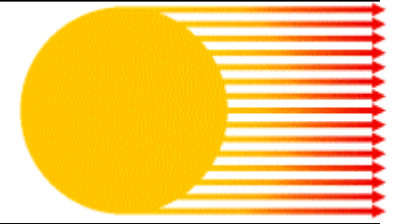
Lösung: Totalreflexion in strukturierten Filmen

Zusammenfassung

Wie funktioniert Solarzelle?



- Photonen werden absorbiert
- Textur erhöht die Lichtweglänge
- Generation von e/h-Paare erzeugt „Überdruck“
- Asymmetrische Dotierung läßt Elektronen nur auf einer Seite und Löcher auf der anderen Seite raus
- Strom = Generation – Rekombination
- Rekombination im Volumenmaterial: Diffusionslänge L
- Diffusionslänge $L >$ Zelldicke W



ZAE BAYERN

Massenproduktion von Solarzellen

Bisher: Silizium aus Mikroelektronik

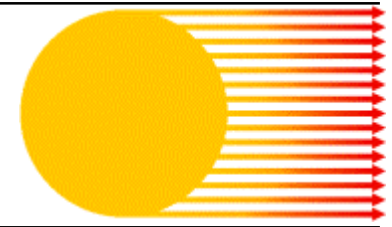


- 25.000 t/a für Elektronikindustrie
- davon 2.100 t/a für Photovoltaik

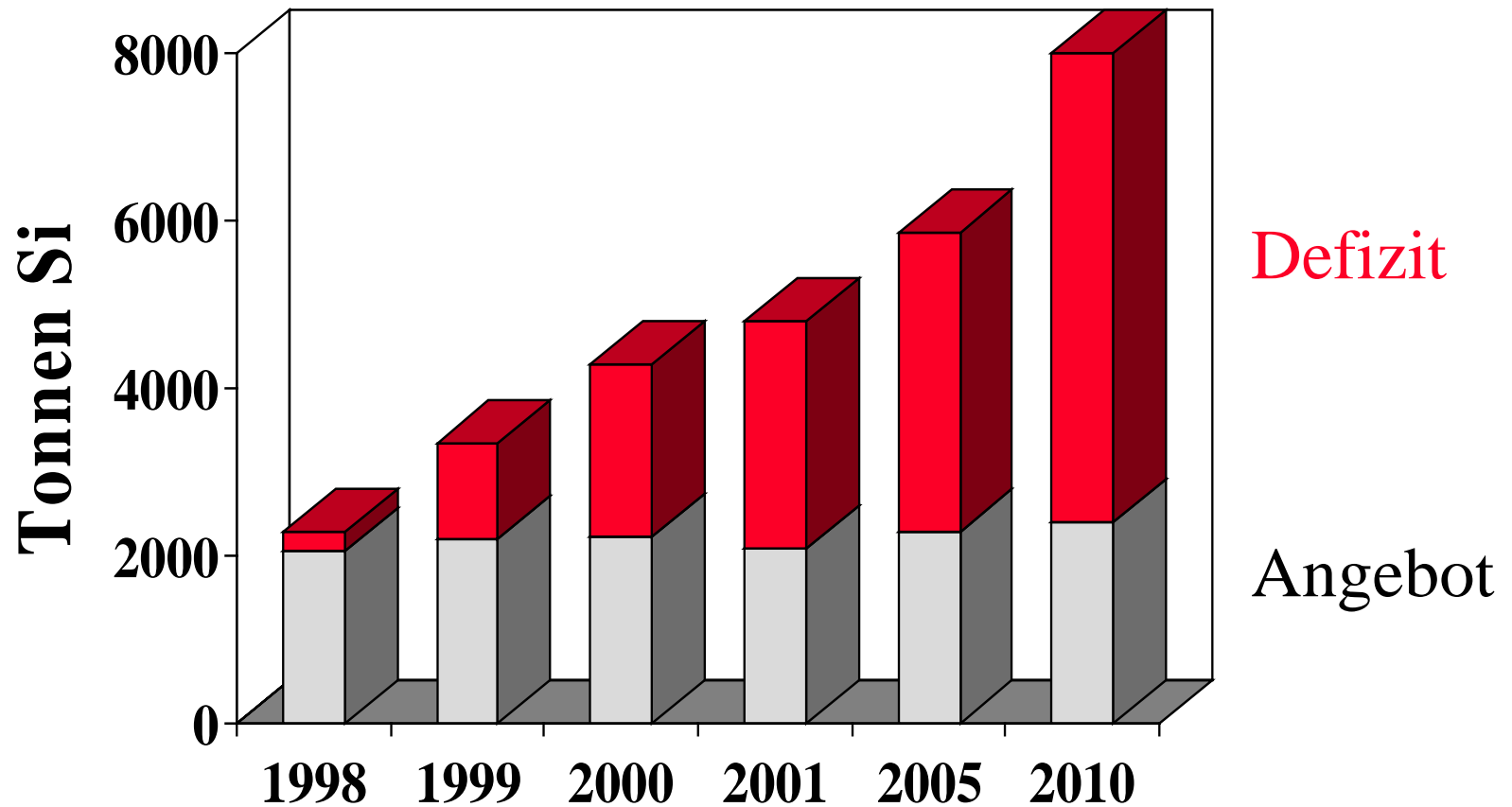


(Photon 9/2001)

In Zukunft: Elektronik-Si wird knapp

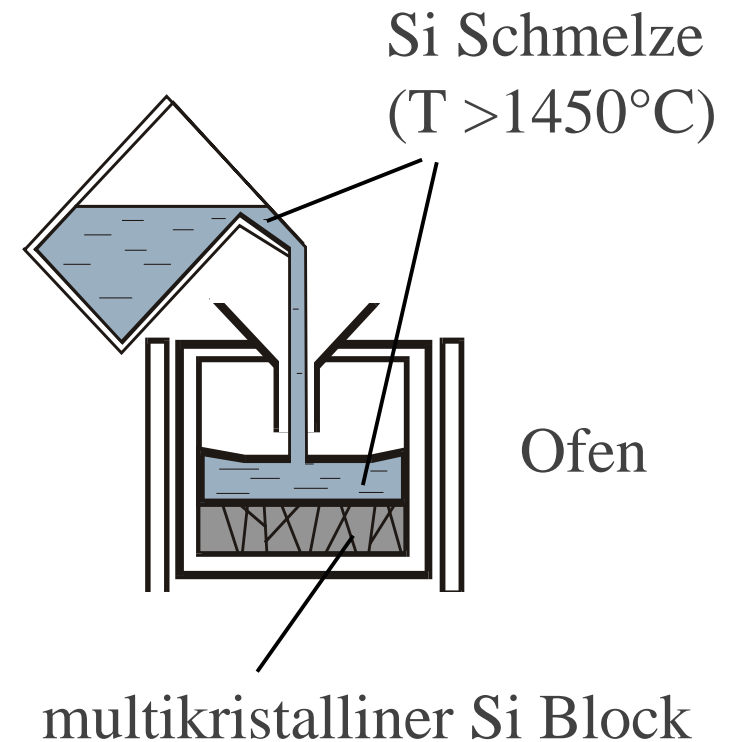
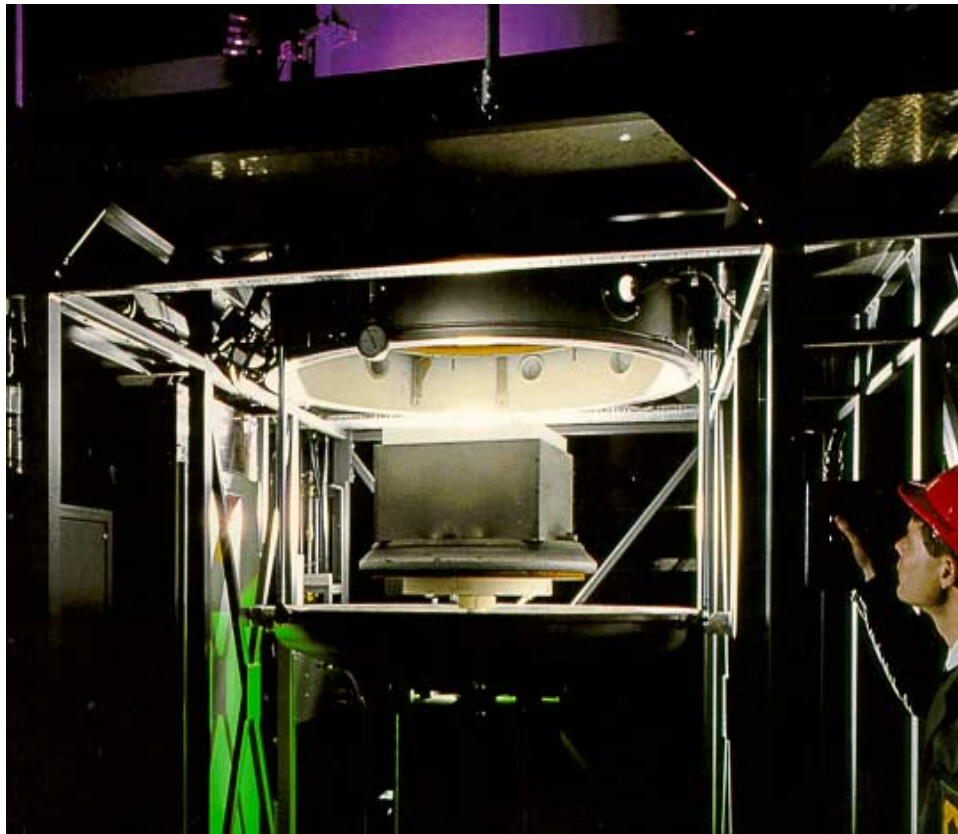


ZAE BAYERN



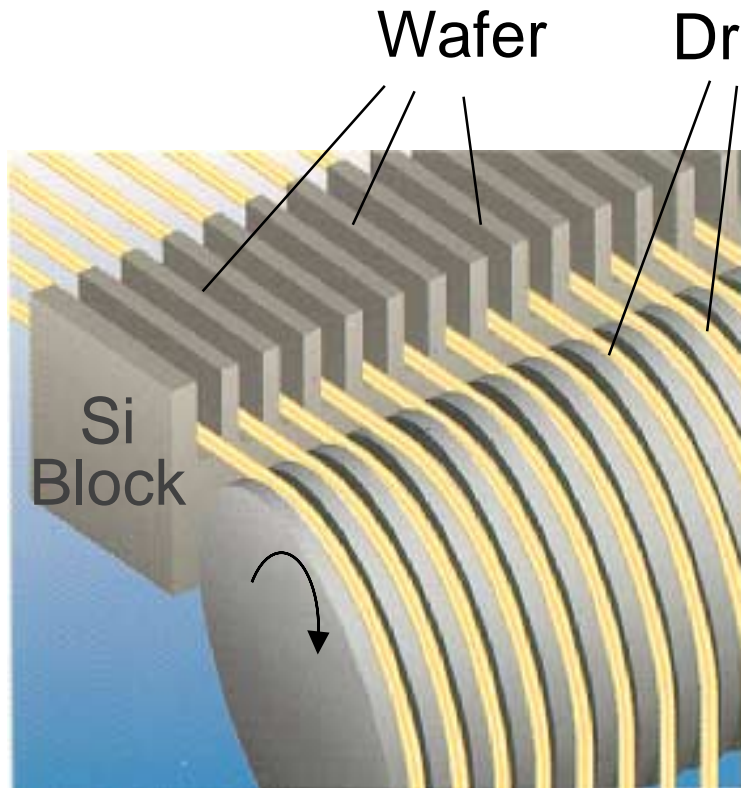
(P. Woditsch, W. Koch, BayerAG/Deutsche Solar)

Herstellung von multikristallinen Blöcken



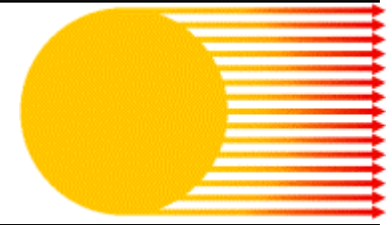
- Blockgießanlage für multikristallines Silizium

Sägen der Siliziumblöcke



■ ca. 30% Materialverlust

Interessante Alternative: Bändersilizium



ZAE BAYERN



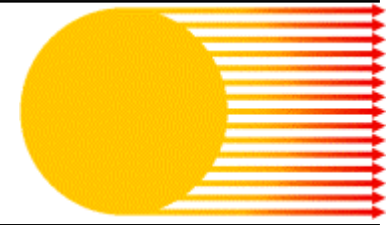
- Vermeiden der Sägeverluste

PV-Fabrik RWE GmbH (Alzenau)



- Fertigungsline (13 MW_p) für PV-Module aus EFG Silizium.

Herstellsequenz von EFG-Siliziumsolarzellen



ZAE BAYERN

1. Reinigung

2. Diffusion

3. Reinigung

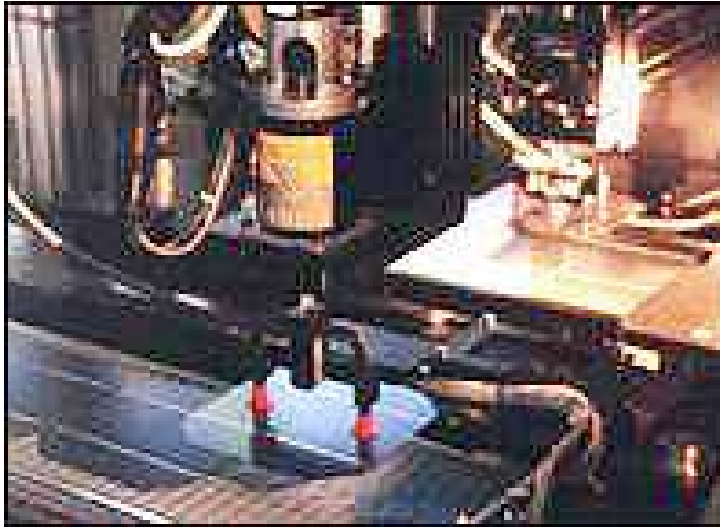
4. Si_3N_4

5. Löt pads

6. Rückkontakt

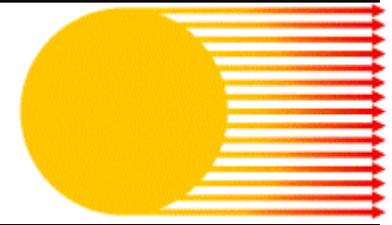
6. Frontkontakt

Verschaltung zu Modulen



- Anflöten der elektrischen Verbinder und Verbinden

Laminieren der Module



ZAE BAYERN



Laminator

Glas

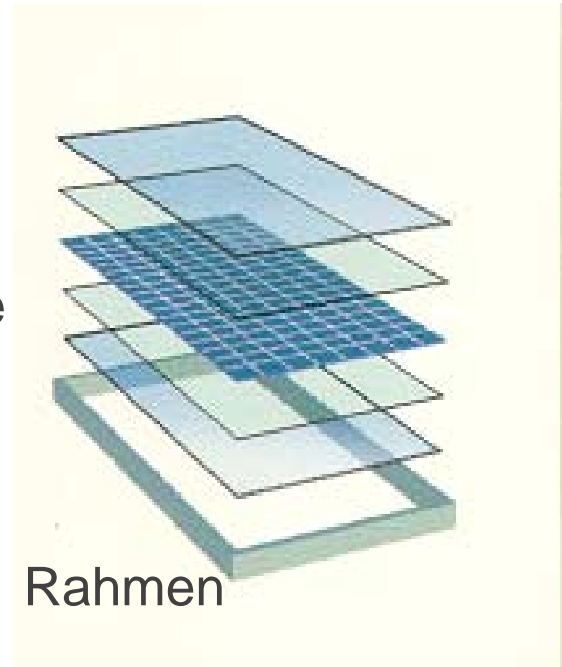
EVA

Zelle

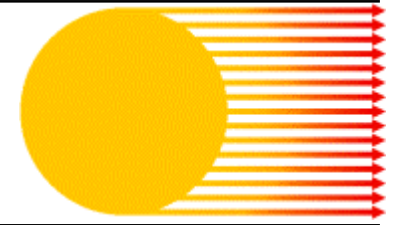
EVA

Glas

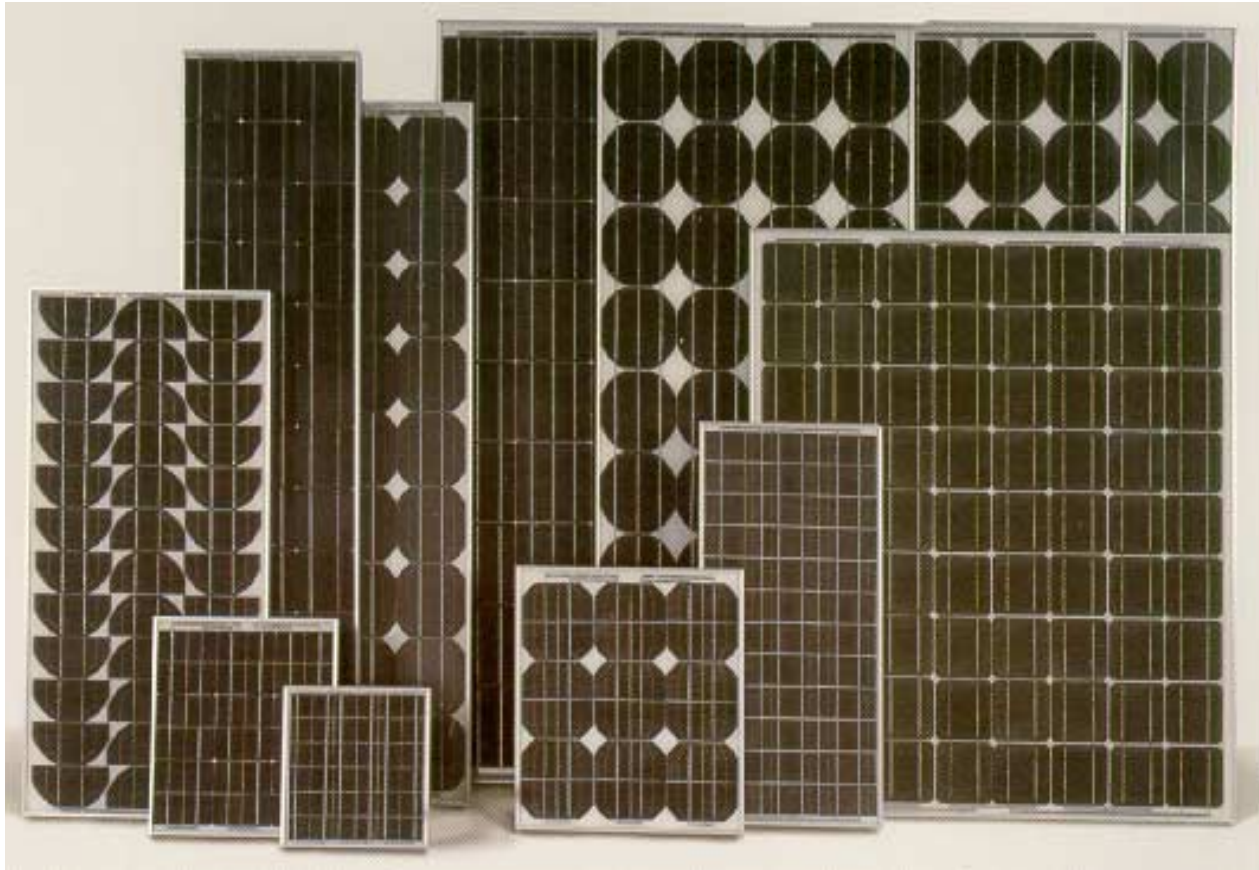
Rahmen



Solarmodule



ZAE BAYERN

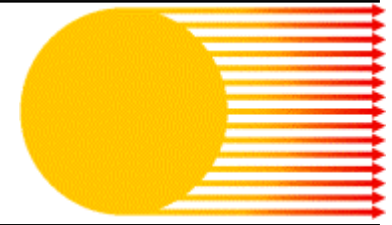


Zusammenfassung: Massenproduktion von Solarzellen

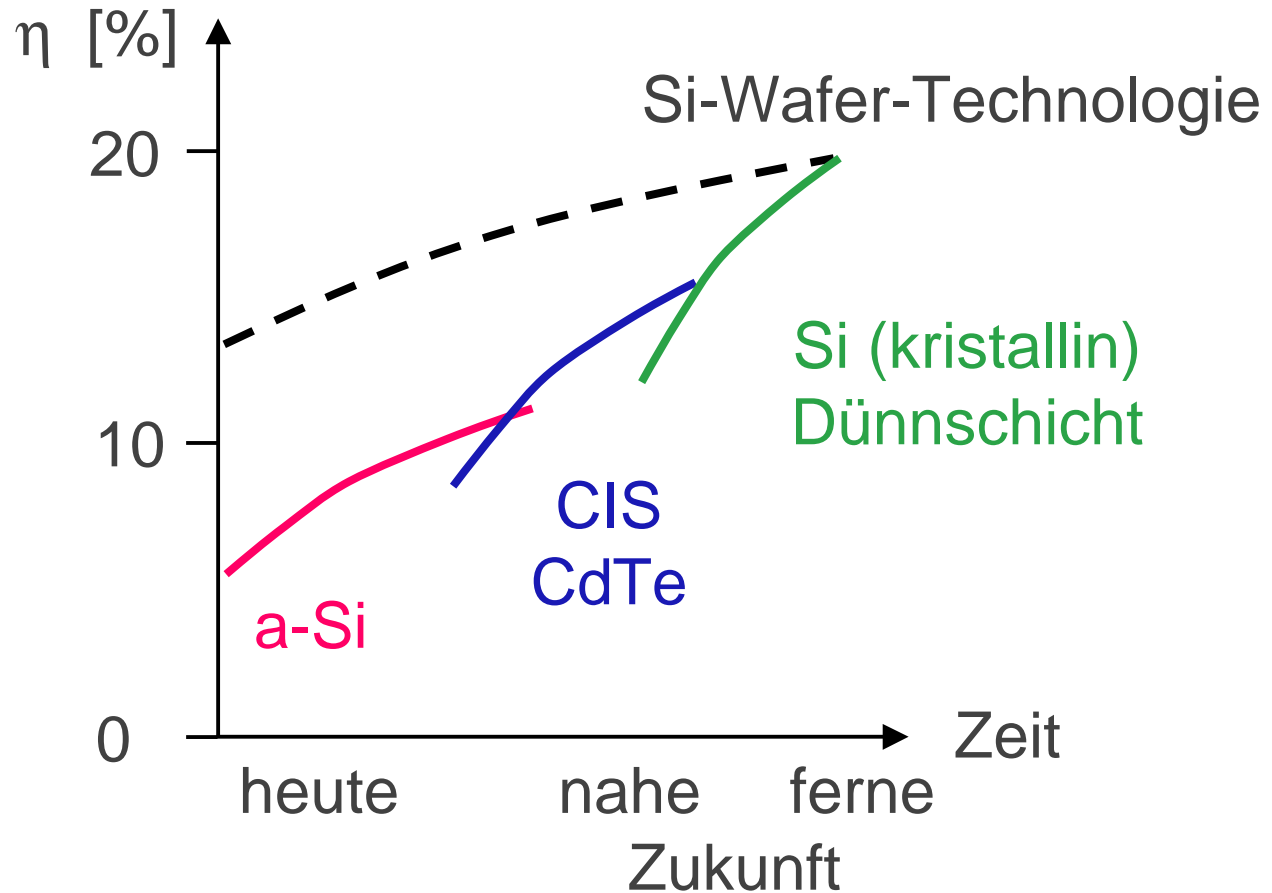


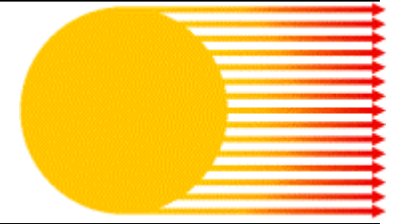
- 12...15% Wirkungsgrad
- Kristallzucht
- Sägen oder Bänderziehen
- Diffusion
- Antireflexschicht
- Siebdruck
- Feuern

Wirkungsgradeerwartung



ZAE BAYERN

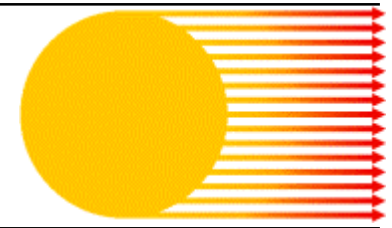




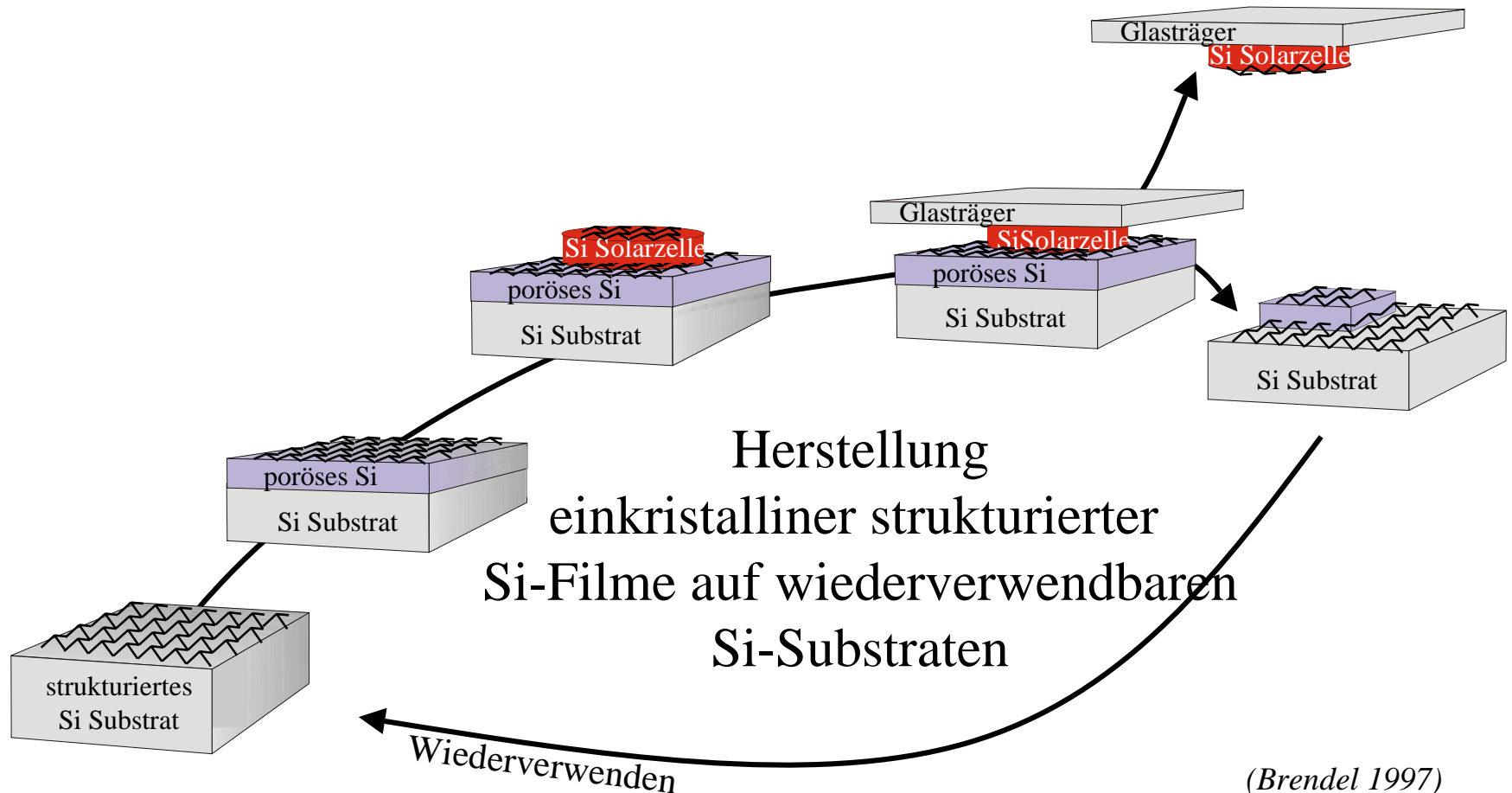
ZAE BAYERN

Dünnschichtzellen für den Weltraum

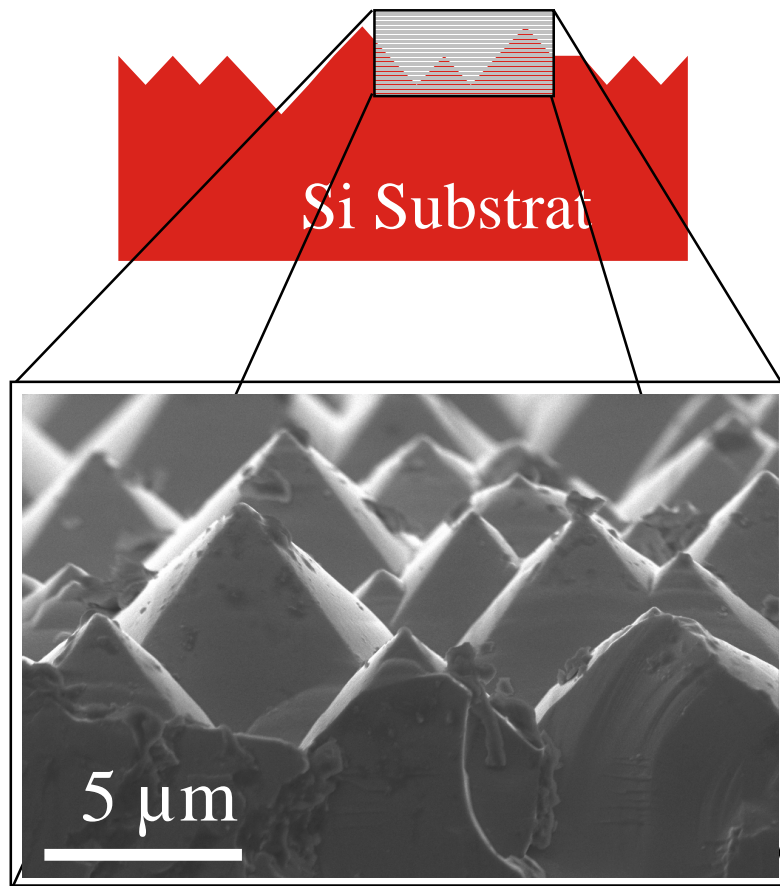
Schichttransfer mit porösem Silizium (PSI-Prozess)



ZAE BAYERN

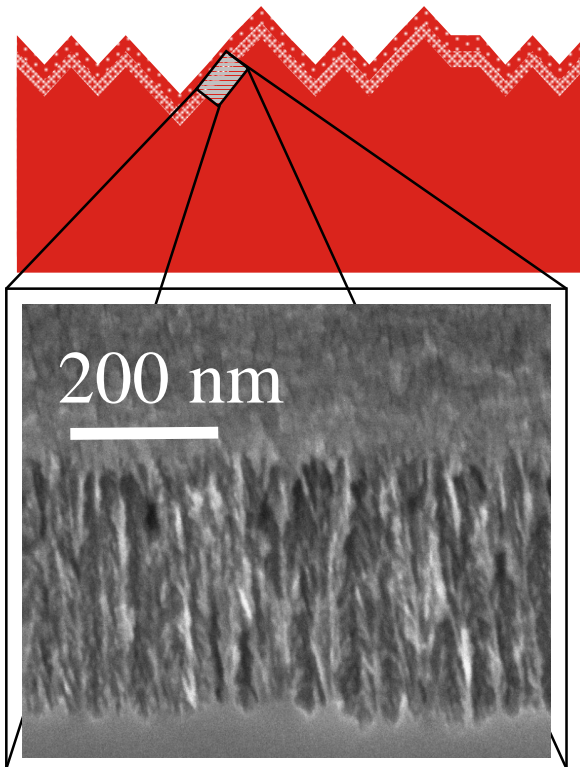


Statistische Texturierung für hohe Absorption



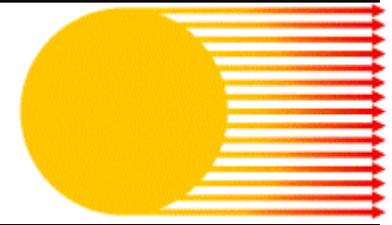
- Ätzen in KOH/Ethanol
- strukturiertes Substrat
- keine Photolithographie

Poröses Silizium

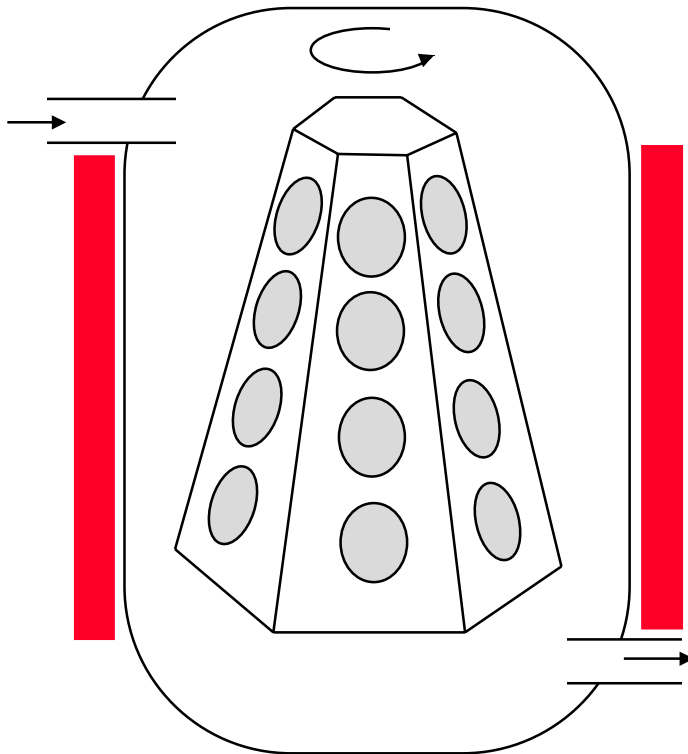


- elektrochemisches Ätzen in Flusssäure/Ethanol
- Doppelschicht-System:
 - niederporöse Deckschicht für Epitaxie
 - hochporöse Sollbruchschicht zum Ablösen

Chemische Gasphasen- abscheidung



ZAE BAYERN



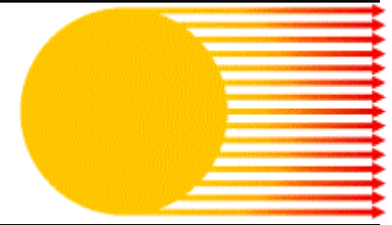
■ Mikroelektronik-Reaktor:

- Substrattemperatur 1100°C
- Wachstumsrate 1 ... 5 $\mu\text{m}/\text{min}$
- Defektdichte $< 10^3 \text{ cm}^{-2}$
- Diffusionslänge $> 35 \mu\text{m}$

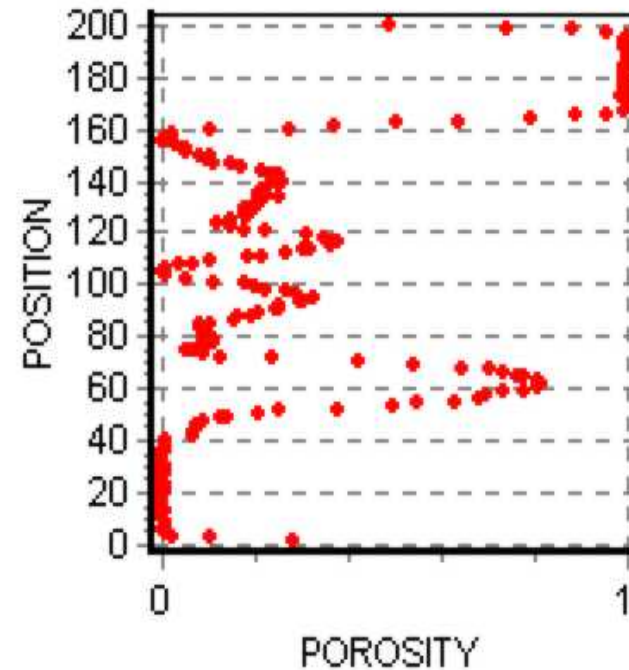
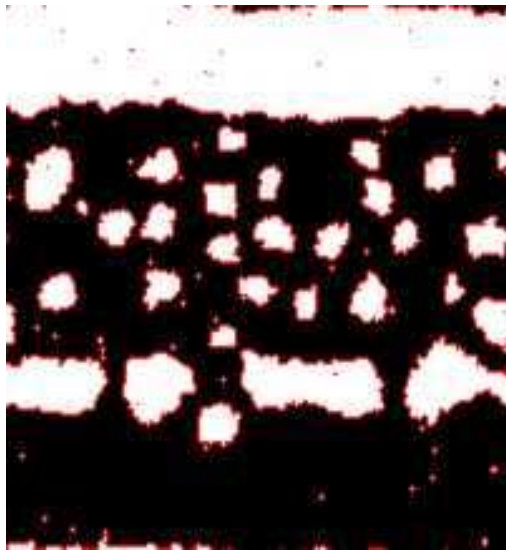
■ zu teuer für Photovoltaik

→ PRISMA: ZAE Bayern und RWE Solar GmbH
entwickeln Reaktor für 40x40 cm²

Simulation: Restrukturierung beim Tempern

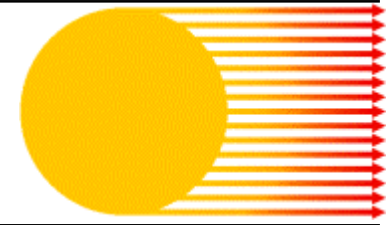


ZAE BAYERN



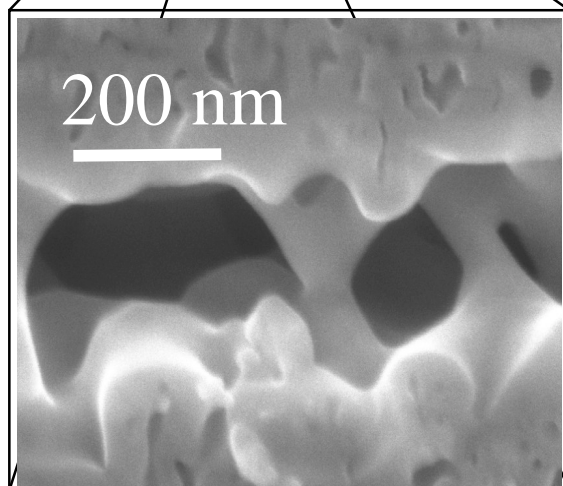
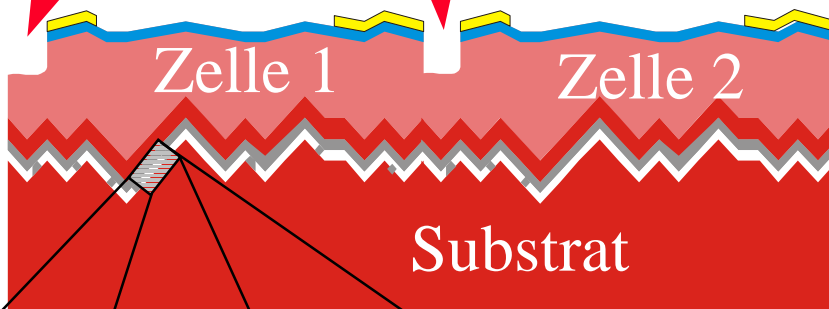
- Treibende Kraft: Reduktion der Oberflächenenergie

Konventioneller Zell-Prozess auf Vorderseite



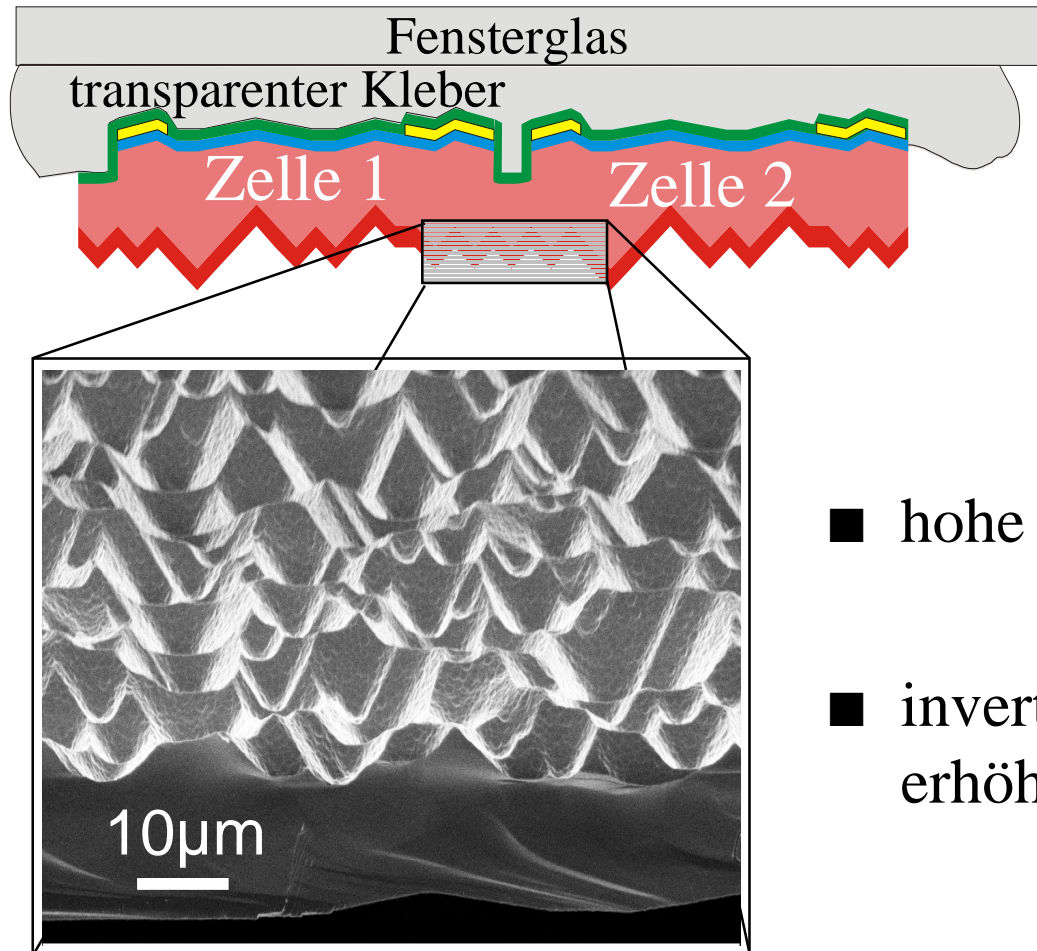
ZAE BAYERN

plasmageätzte Gräben



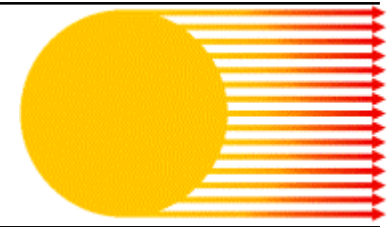
- weitestgehend übertragbar auf industrielle Fabrikationslinie
- Sollbruchschicht wie simuliert

Ablösen des Si-Substrates

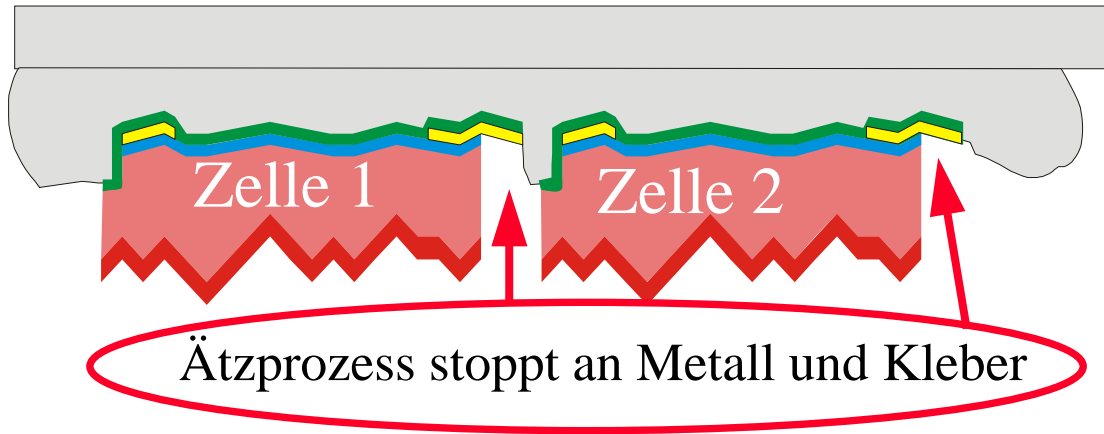


- hohe Ausbeute beim Ablösen
- invertierte Pyramiden für erhöhte Lichtabsorption

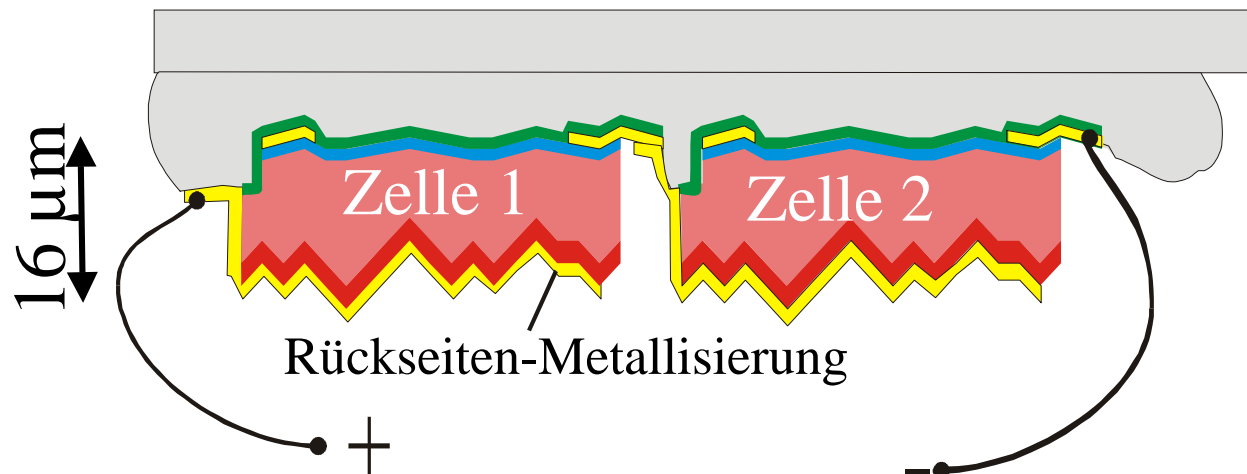
Neuer Modul-Prozess für integrierte Verschaltung



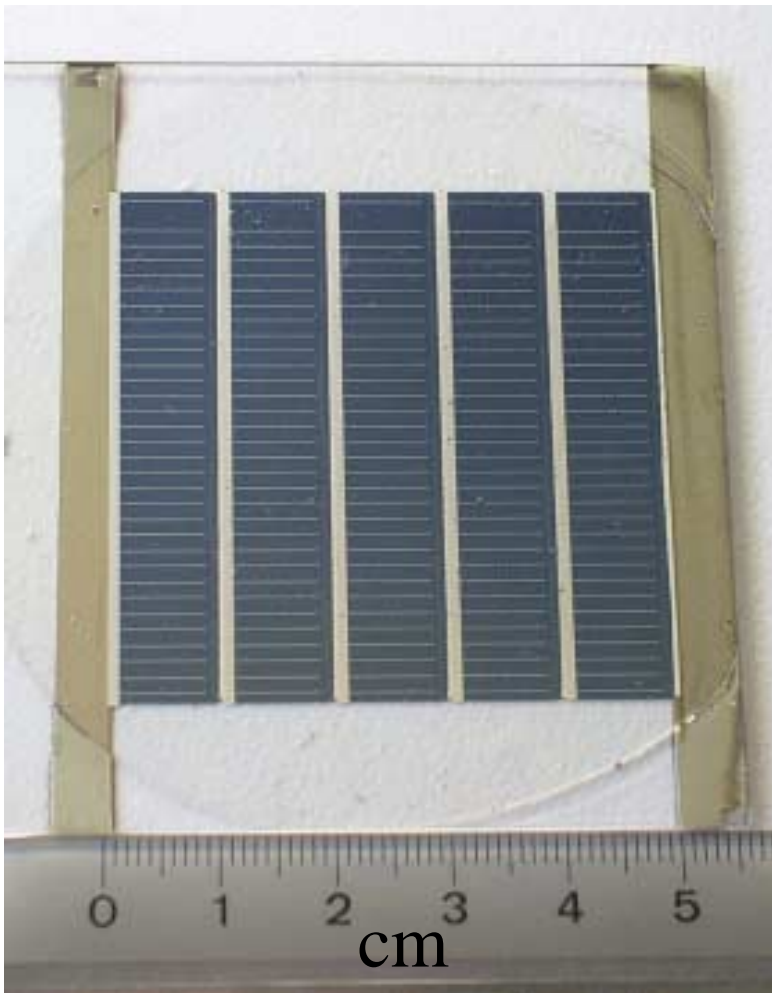
ZAE BAYERN



- Rückseite zugänglich
- Plasmaätzen 12 min
- Reaktor 40x40cm²

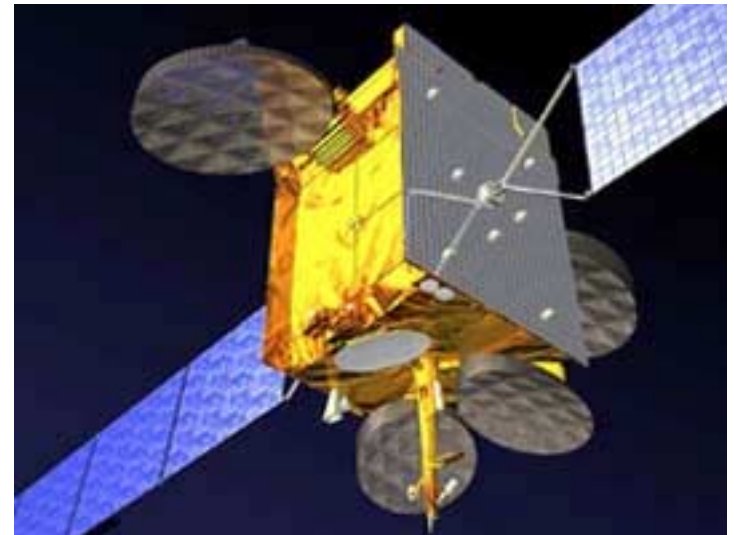


PSI-Dünnschichtmodul



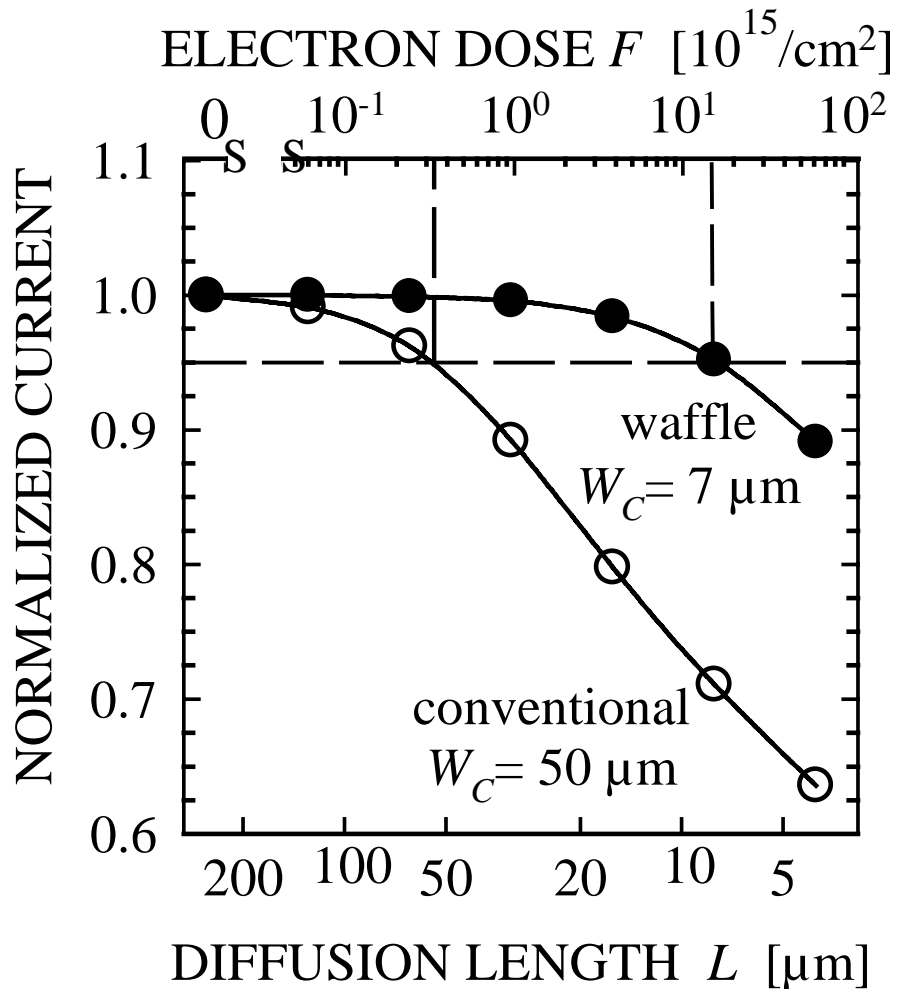
- Modul ($16 \mu\text{m} \times 25 \text{cm}^2$):
 - $V_{oc} = 3035 \text{ mV}$
(607 mV pro Zelle)
 - $\eta = 10.6 \%$
 - **keine Photolithographie**
 - nur ein zusätzlicher Schritt im Vergleich zur Einzelzelle
- Einzelzelle ($25 \mu\text{m} \times 4 \text{cm}^2$):
 - $V_{oc} = 623 \text{ mV}$
 - $\eta = 15.4 \%$

Si-Photovoltaik im Weltraum



- Schädigung durch Elektronen und Protonenbeschuss

Simulation der Degradation



- Dünne Zellen:
 - $L > W$ gilt länger
 - Startgewicht niedriger
 - flexibel

Zusammenfassung: Dünnschichtzellen



- neue PSI-Dünnschicht-Modultechnologie entwickelt:
 - Rekonstruktion von porösem Si
 - internationaler Spitzenwert für Wirkungsgrad

- wichtige Anforderungen für Weltraum erfüllt:
 - niedriges Startgewicht
 - verbesserte Strahlungsresistenz

- wichtige Anforderungen für terrestrischen Einsatz erfüllt:
 - wenig Si-Verbrauch
 - einfacher photolithographiefreier Prozess
 - einfache Verschaltungstechnik