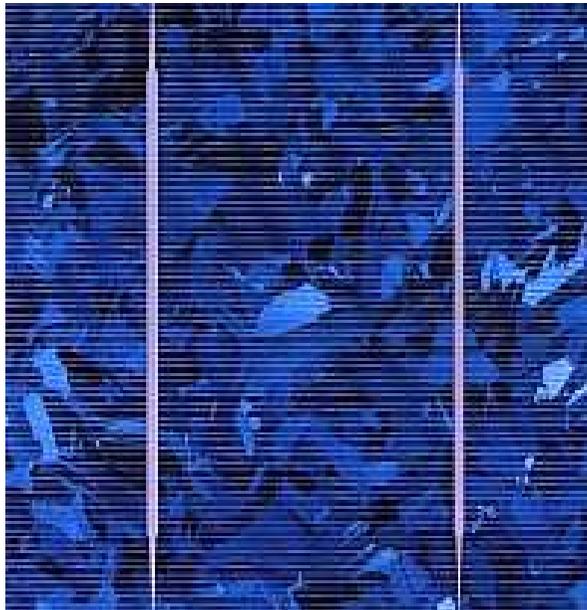


# Photovoltaik

Herstellung und innovative Konzepte

Von Sebastian Illing und Nora Igel

## Inhaltsübersicht

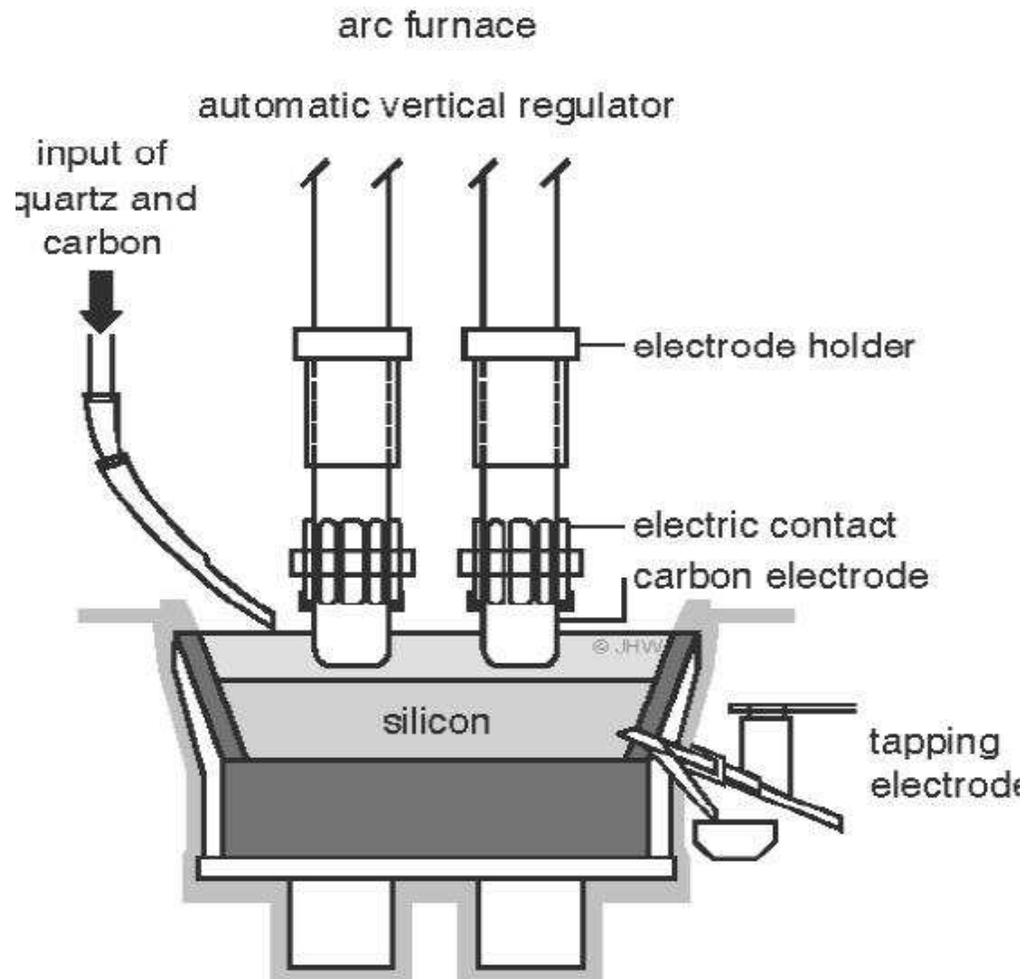


### 1. Herstellung

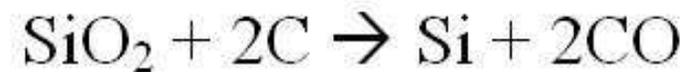
- 1.1 Siliziumproduktion
- 1.2 Zellenproduktion
  - 1.2.1 Texturierung
  - 1.2.2 Dotierung
  - 1.2.3 Passivierung
  - 1.2.4 Metallisierung

### 2. Innovative Konzepte

- 2.1 Rückseitenzelle
- 2.2 Bifacial Zellen
- 2.3 Konzentratorzelle
- 2.4 Dünnschichtzellen
- 2.5 Tandem Zellen
- 2.6 Organische Zellen
- 2.7 Dritte Generation



### Schmelzflusselektrolyse

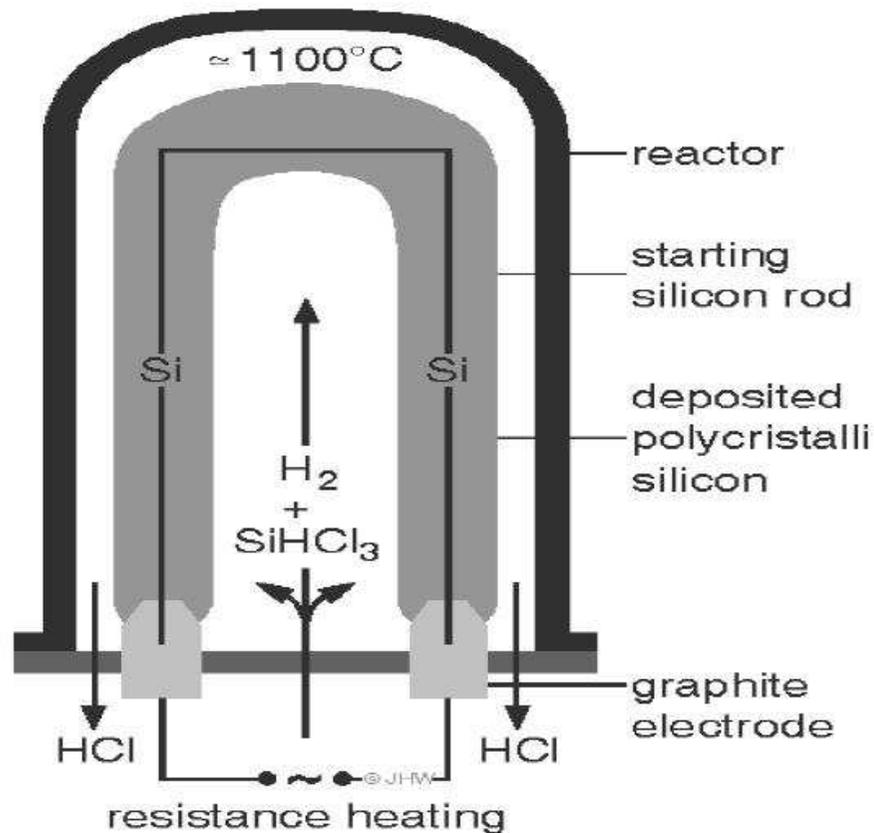


$T \approx 1800^\circ\text{C}$

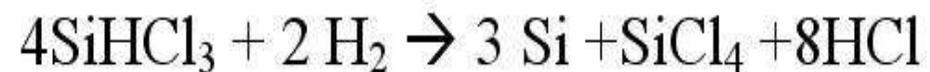
Reinheit : 98%

Schmelzofen zur Herstellung von metallurgischem Silizium

## Chemical Vapor Deposition (CVP)



Anlage zur industriellen Abscheidung von Polysilizium

Siemens Prozess

Endprodukt: Si-Stäbe

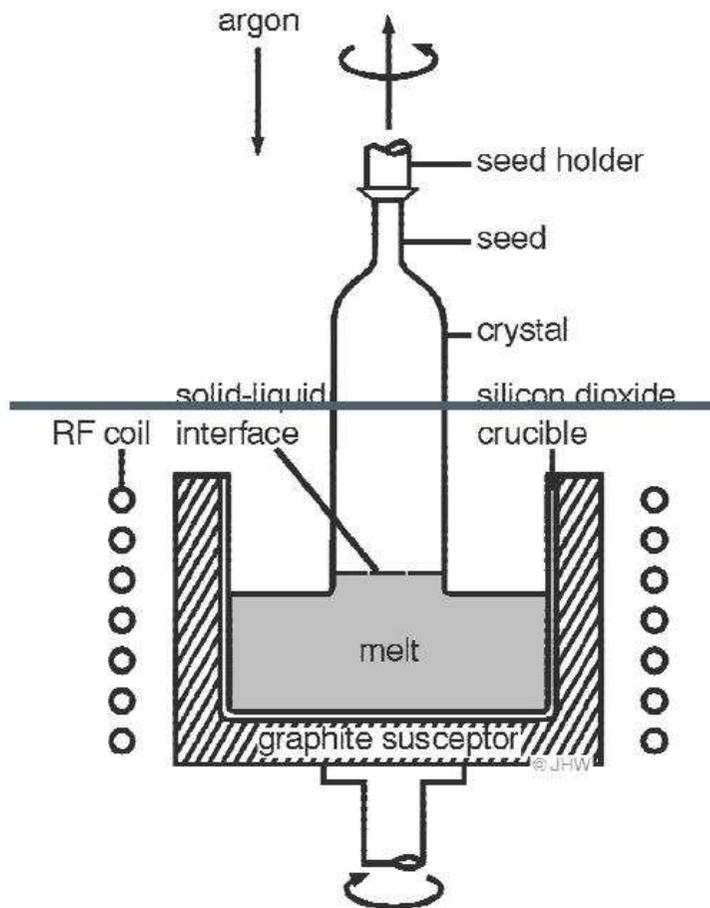
Czochralski Verfahren

Abb.1: Schematische Darstellung des Einkristallziehen nach Czochralski



Abb.2: Fertiger Si-Einkristall nach Czochralski

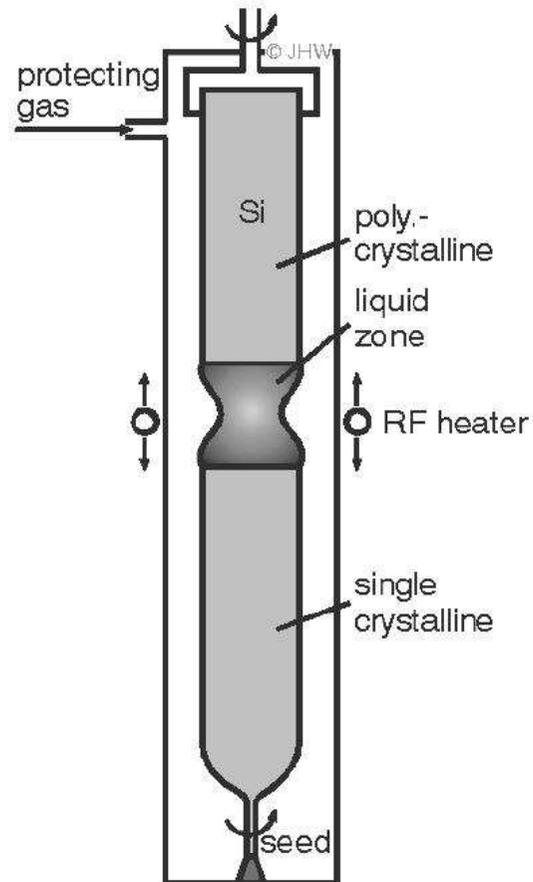
Zonenziehverfahren

Abb.1: Schematische Darstellung des Zonenziehverfahrens

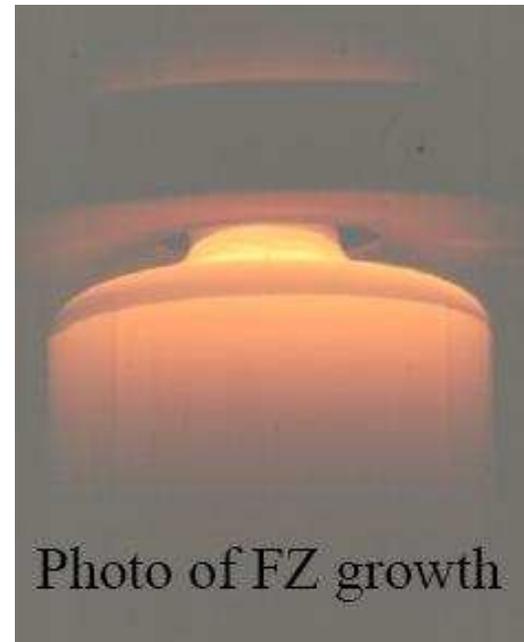
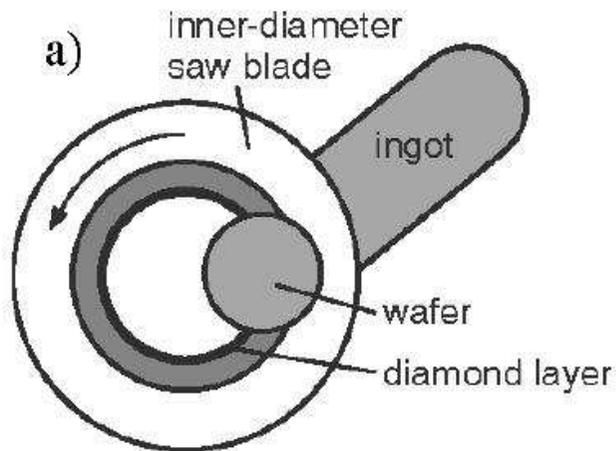


Abb.2: Float-zoning

Dotierung: Phosphin, Diboran

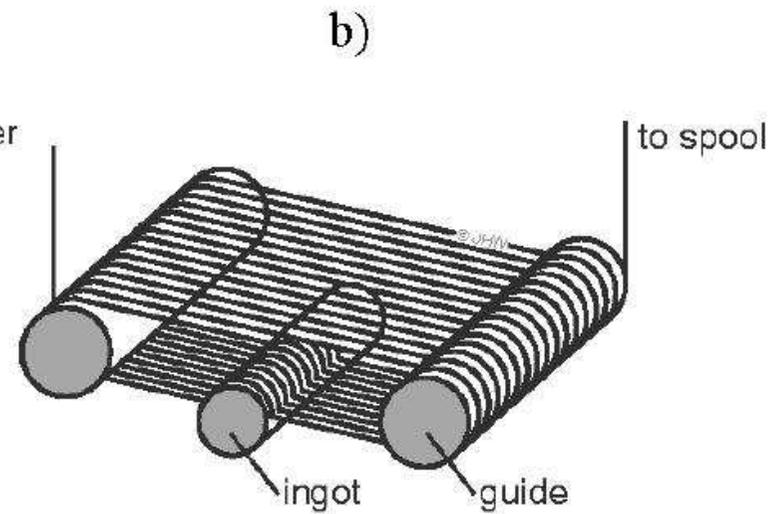
## Herstellung von Si-Scheiben



Verwendung eines  
Innenloch-Sägeblatts

50% Verluste

→ 0,2 -0,4 mm dicke Scheiben



Drahtziehtechnik

35% Verluste

02.06.08

Blockgießen

-Polykristallines Si  
- 30x30cm<sup>2</sup>

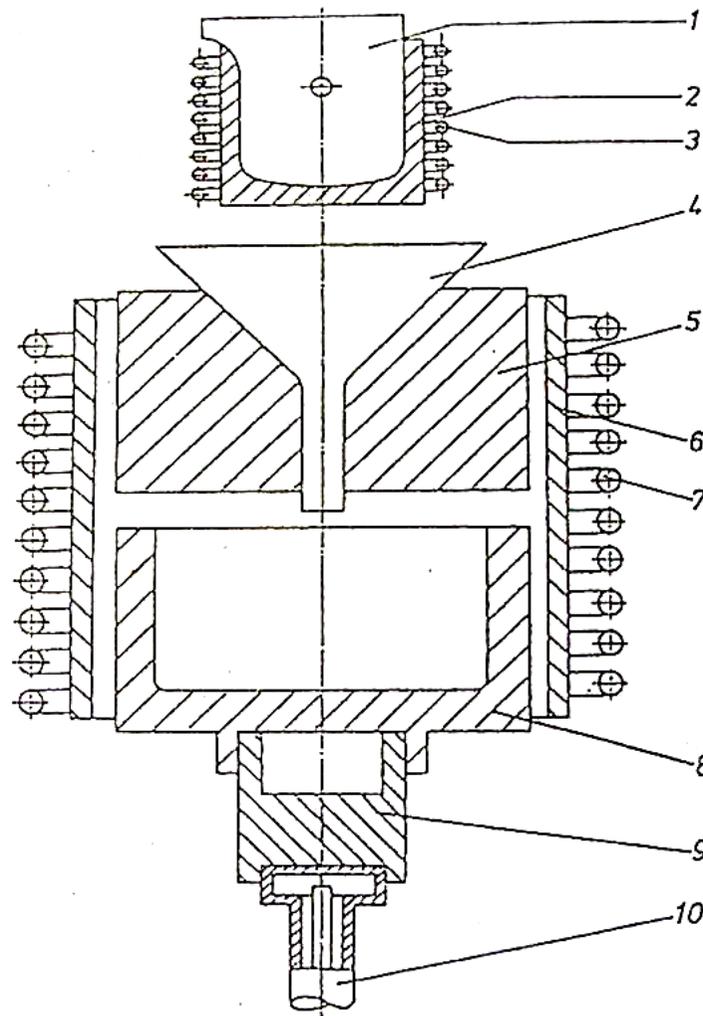


Abb. 7.6 Schema einer Blockgießanlage [8]

(1) Quarztiegel  
(8) Graphittiegel

## Folienmaterialien

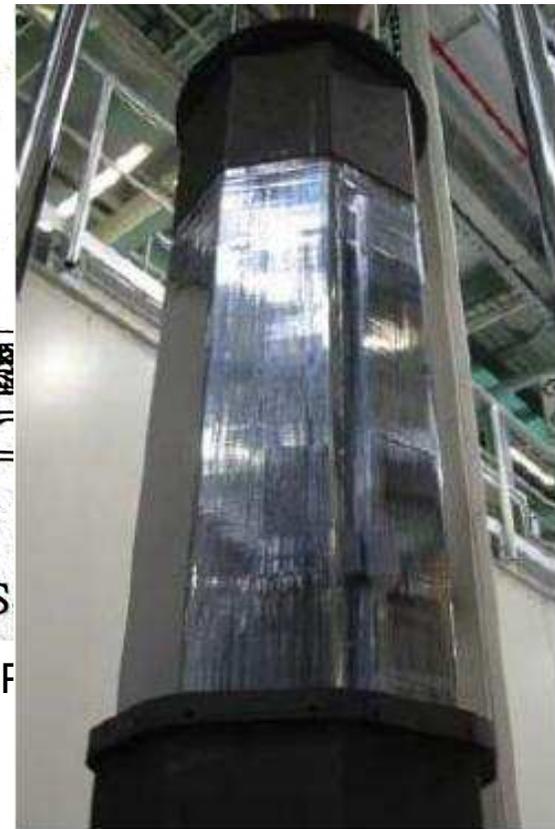
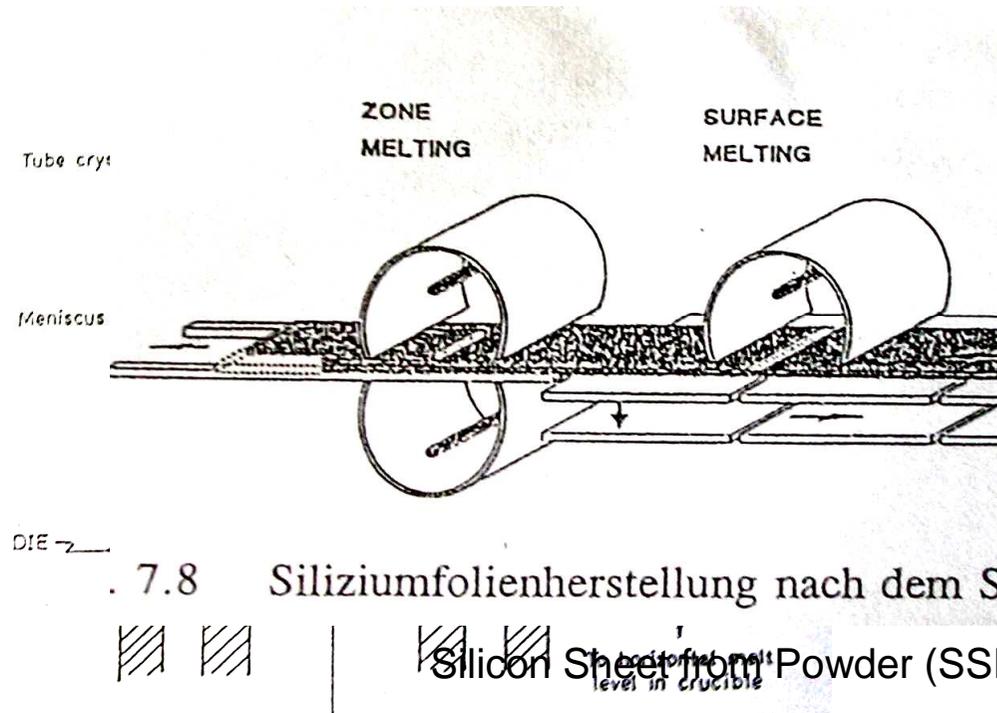
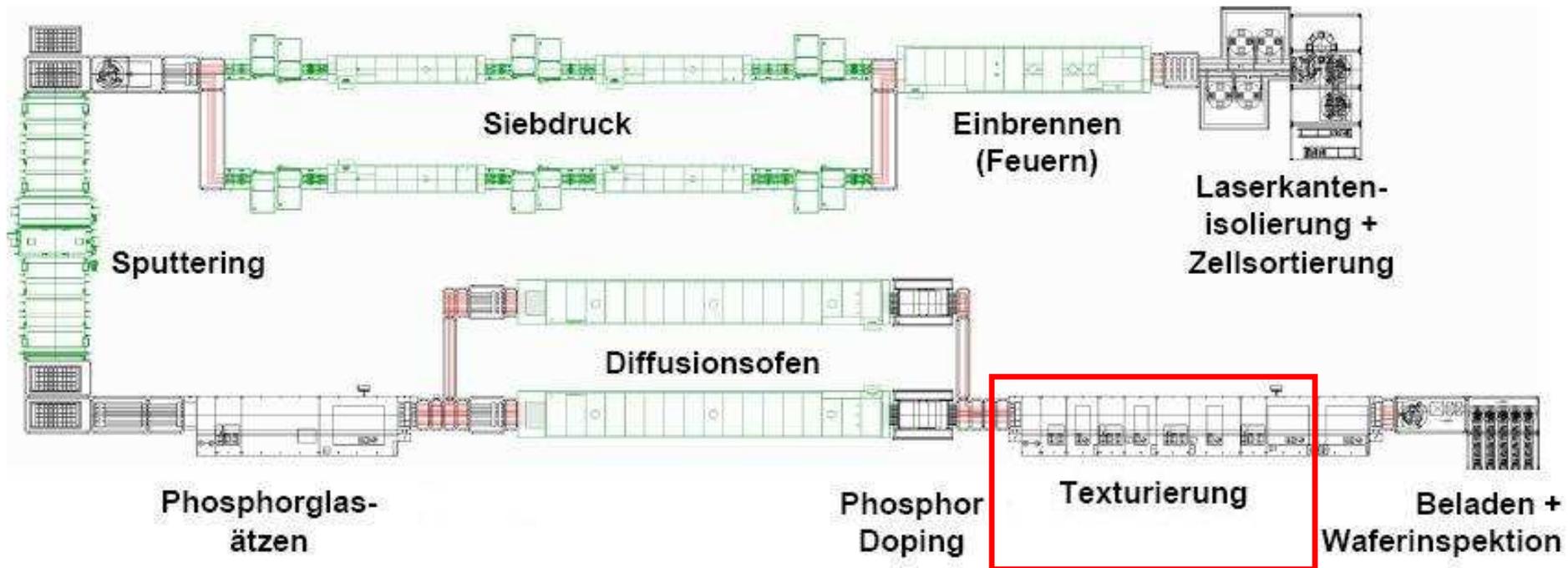


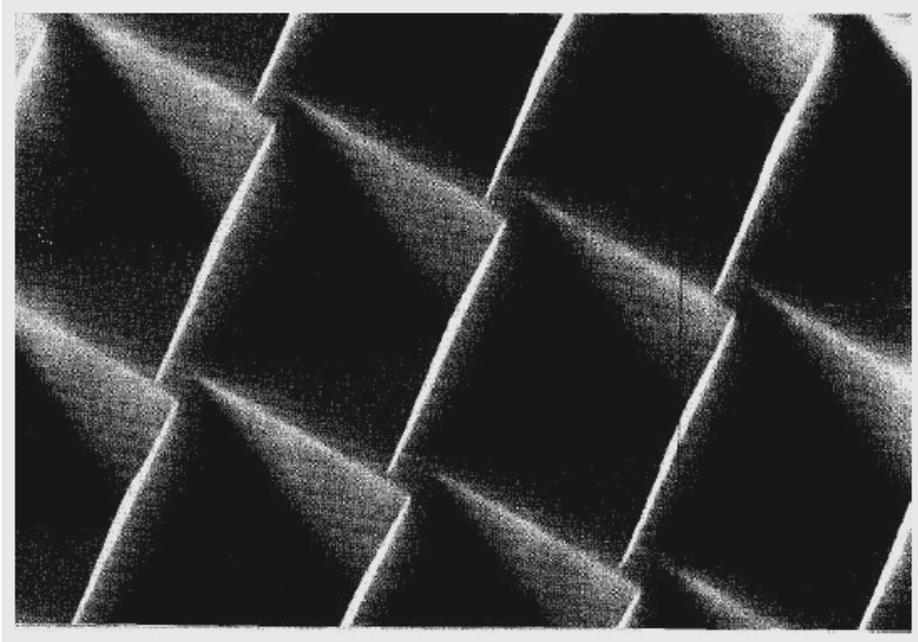
Abb. 7.7 Prinzip einer EFG - Anlage [10]

Edge defined Film Growth (EFG)

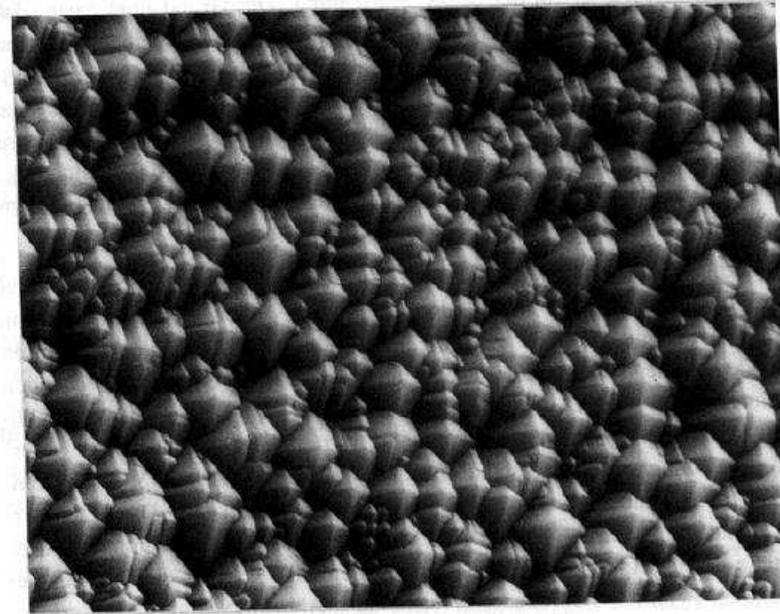
02.06.08

## Zellen - Produktionslinie – 30/60 MW

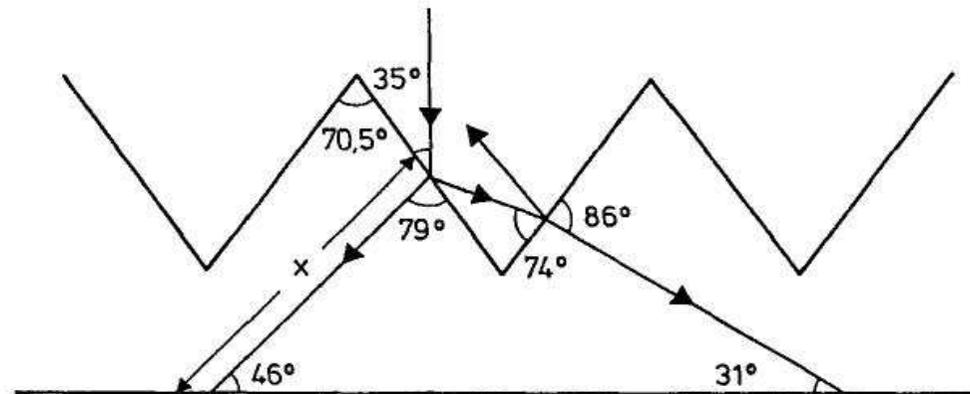




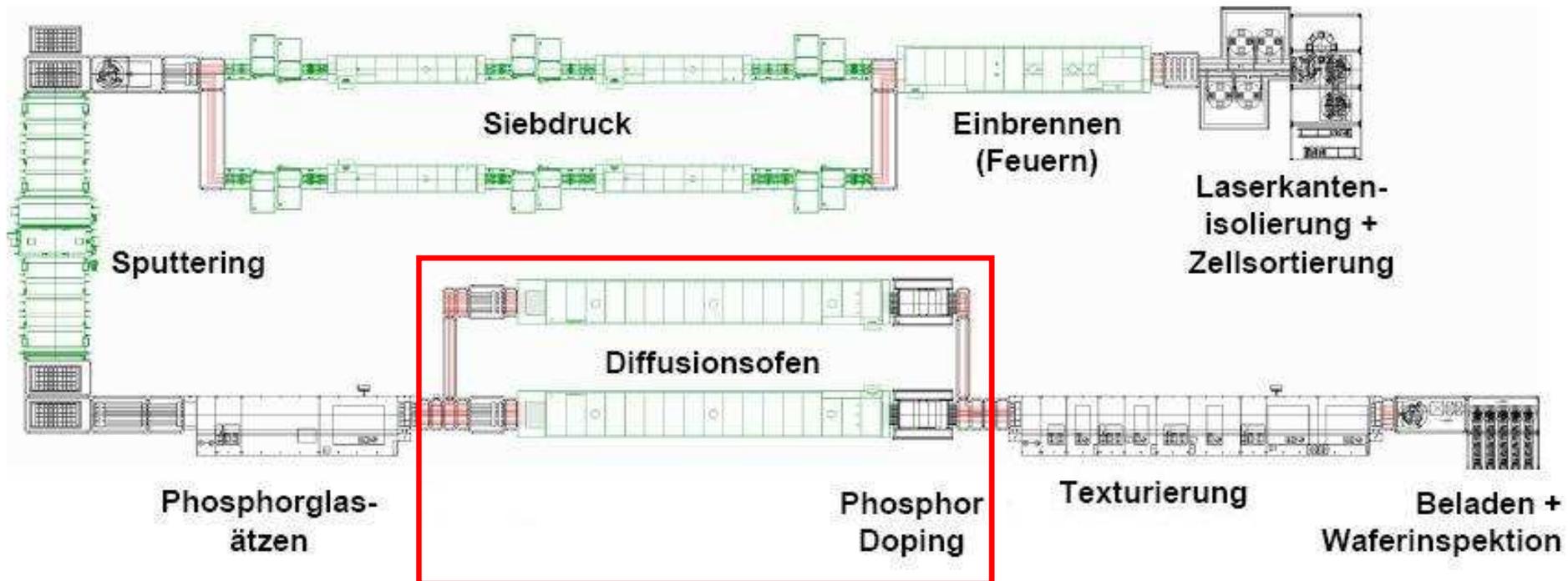
Invertierte Pyramiden  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$



Random Pyramids



### Zellen - Produktionslinie – 30/60 MW



Diffusionsprozess

2. Fick'sches Gesetz

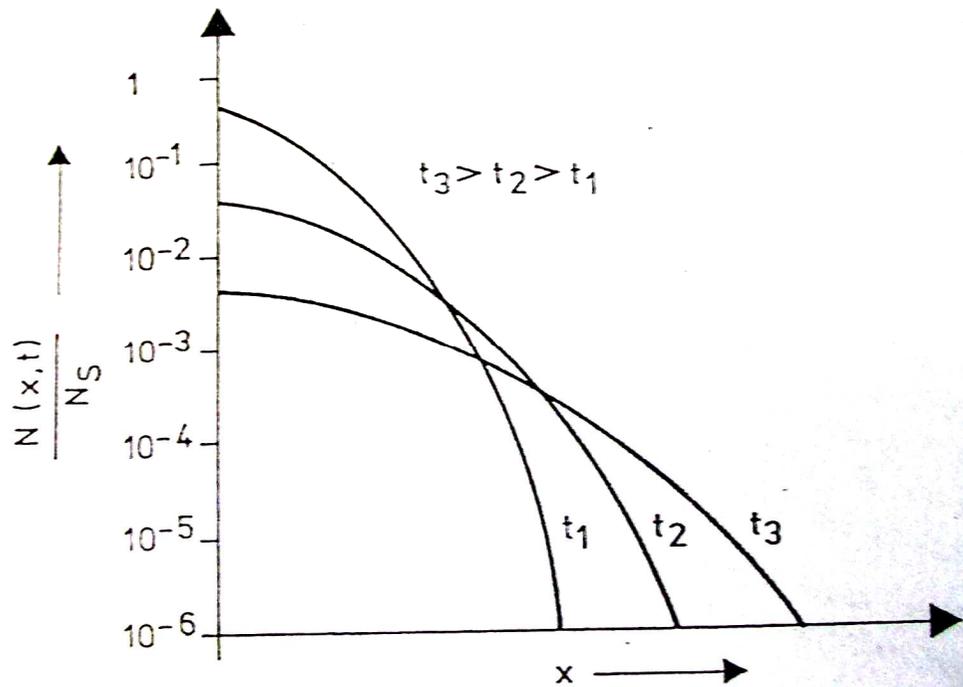
$$\frac{\partial N(x, t)}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 N(x, t)}{\partial x^2}$$

Gauss -  
Verteilung

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \cdot \exp - \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)^2$$

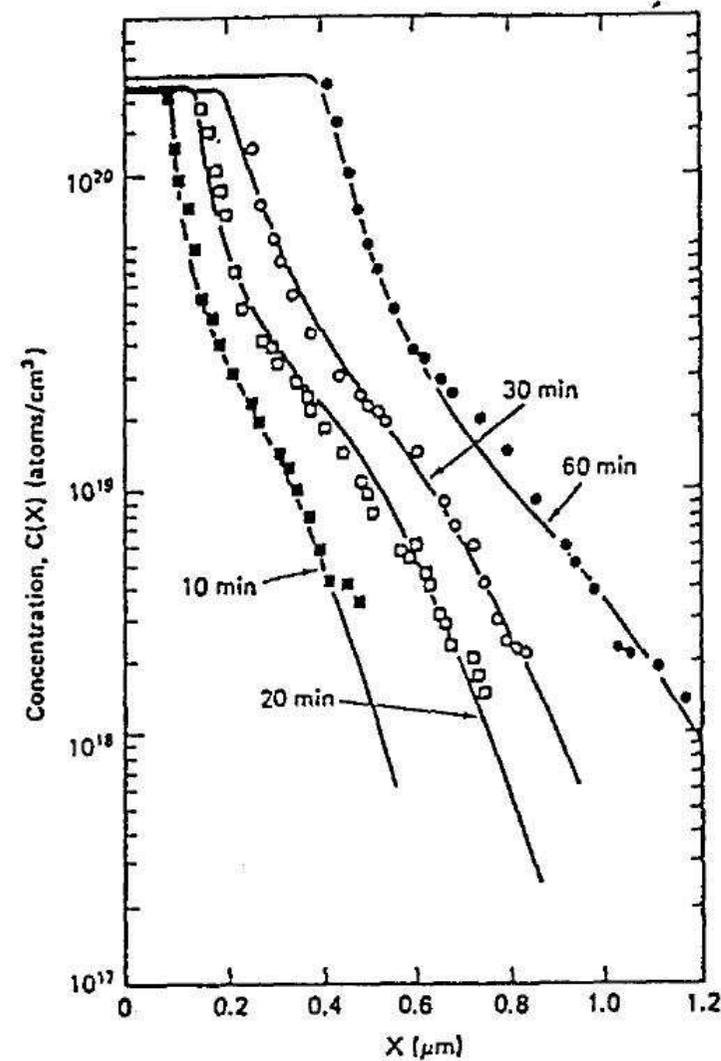
Diffusionskoeffizient

$$D = D_0 \cdot \exp - \frac{A}{kT}$$



Theoretische Kurven

Diffusionsquelle: Phosphorsilicatglas

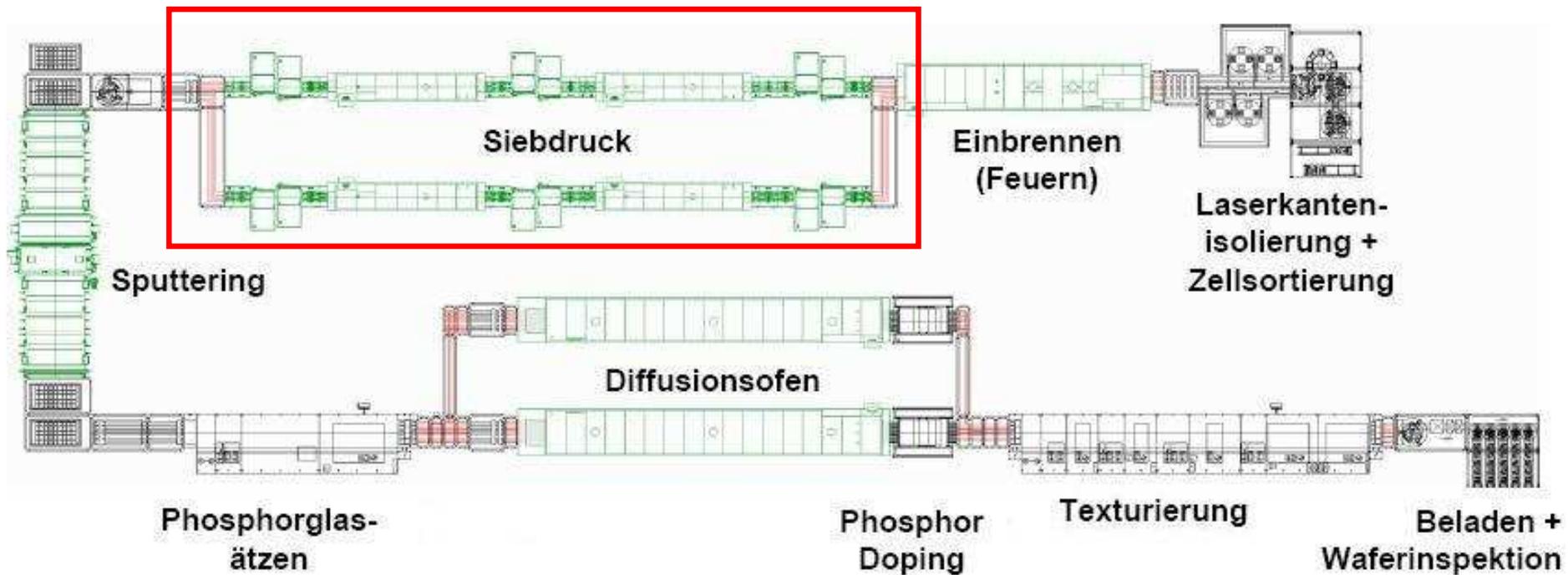


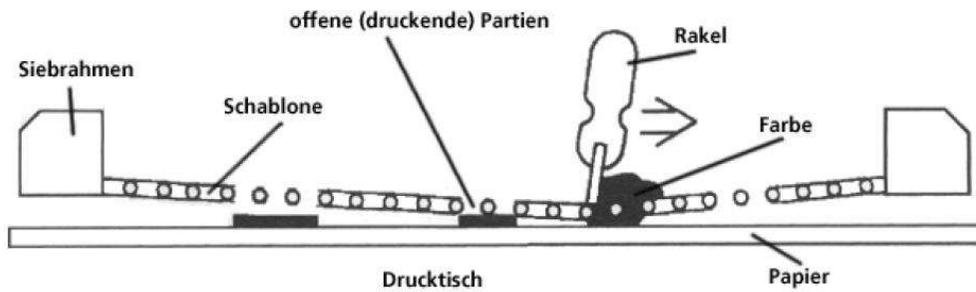
Phosphorprofile bei Diffusionstemperaturen von 950°C in Abhängigkeit der Diffusionszeit

### Sputtering

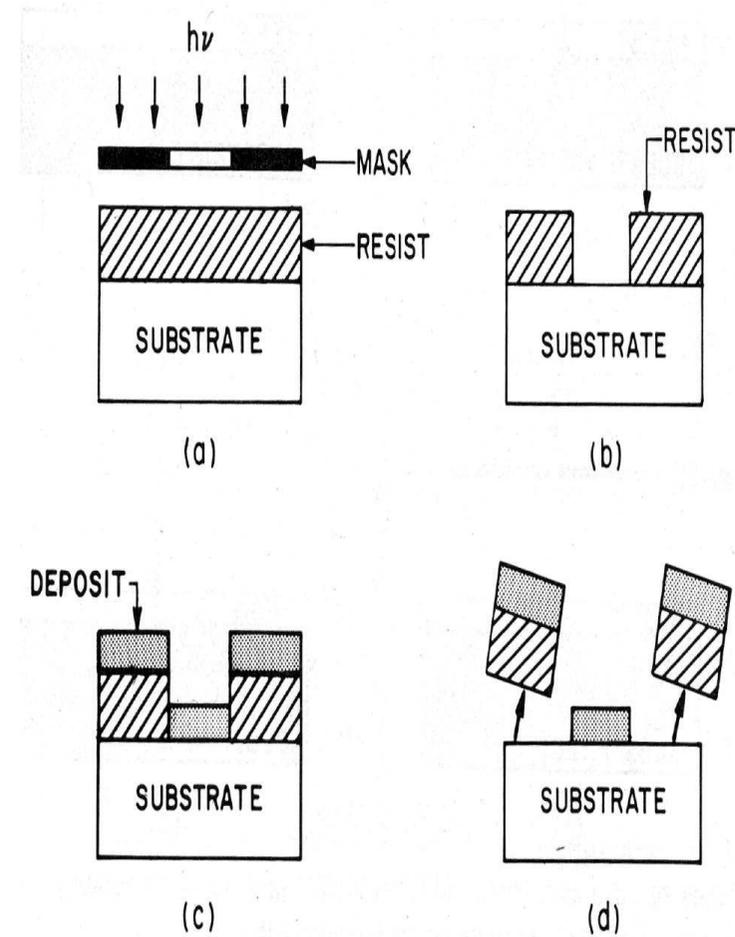


### Zellen - Produktionslinie – 30/60 MW



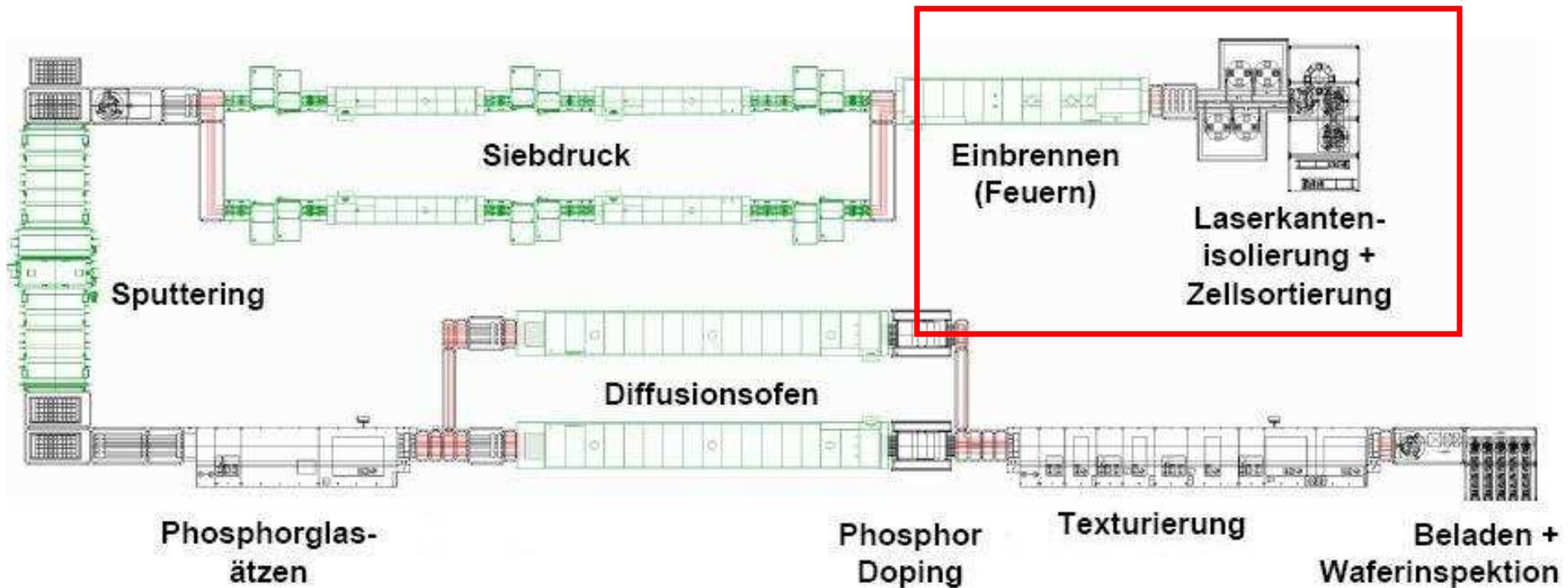


Siebdruckverfahren zur Aufbringung der Frontkontakte

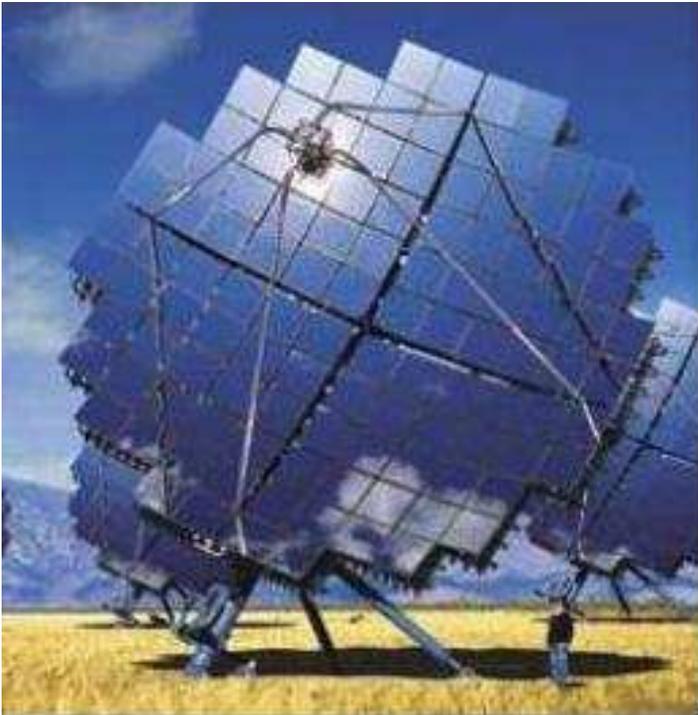


Lift-off Verfahren

### Zellen - Produktionslinie – 30/60 MW



## Inhaltsübersicht



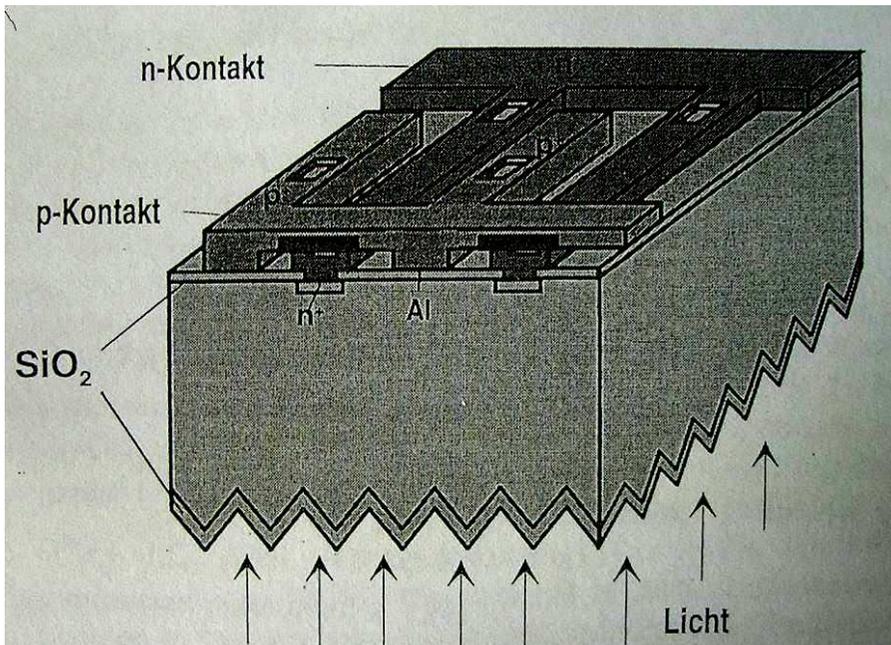
### 1. Herstellung

- 1.1 Siliziumproduktion
- 1.2 Zellenproduktion
  - 1.2.1 Texturierung
  - 1.2.2 Dotierung
  - 1.2.3 Passivierung
  - 1.2.4 Metallisierung

### 2. Innovative Konzepte

- 2.1 Rückseitenzelle
- 2.2 Bifacial Zellen
- 2.3 Konzentratorzelle
- 2.4 Dünnschichtzellen
- 2.5 Tandem Zellen
- 2.6 Organische Zellen
- 2.7 Dritte Generation

02.06.08



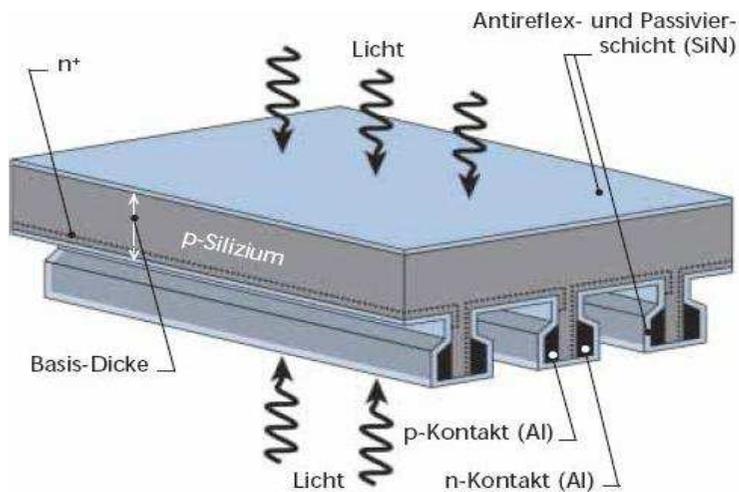
### Vorteile:

- Keine Abschattungsverluste
- Metallkontakte großflächig → geringer Widerstand
- Wirkungsgrad 18.5 %

### Nachteile:

- Hohe Diffusionslänge notwendig für geringe Oberflächenrekombination
- Isolierung der Kontakte notwendig

02.06.08

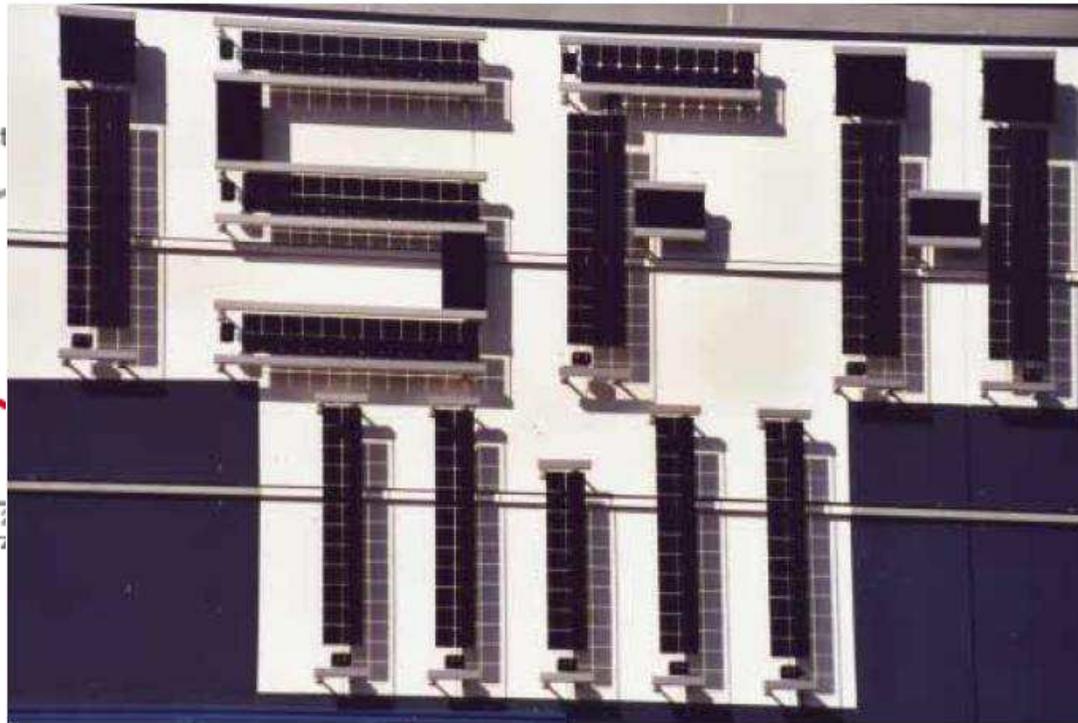
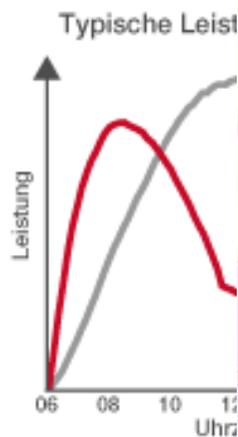


Vorteile:

- Beidseitige Beleuchtung
- Wirkungsgrad 20% auf Rückseite  
21,4% Vorderseite

Nachteil:

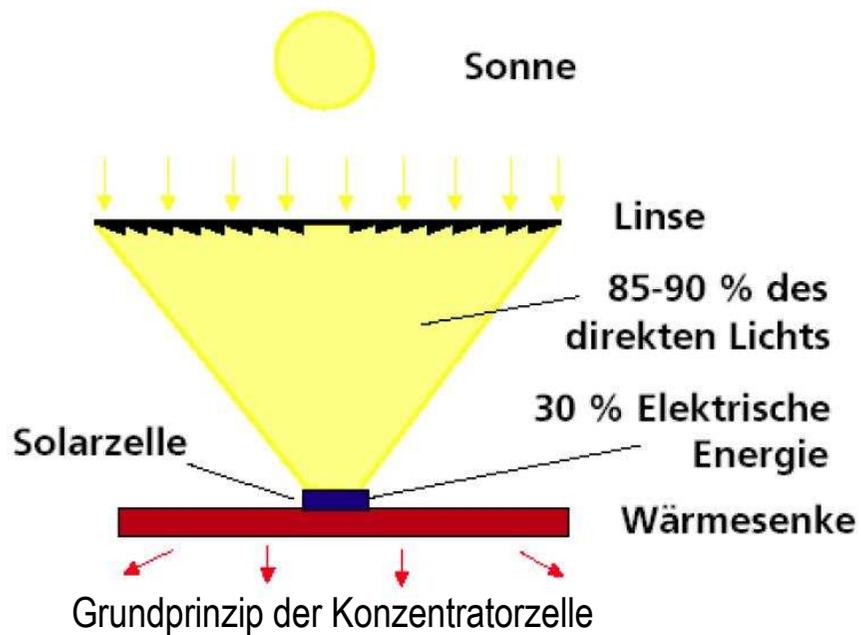
- Hohe Anforderungen an Material und Technologie



... in Aubrugg  
(120m)

Bifacial-Zellen an der Fassade des ISFH Gebäudes

02.06.08



Sharp-Konzentrator Modul:  
500-fach Konzentriertes Licht  $\rightarrow \eta \approx 40\%$

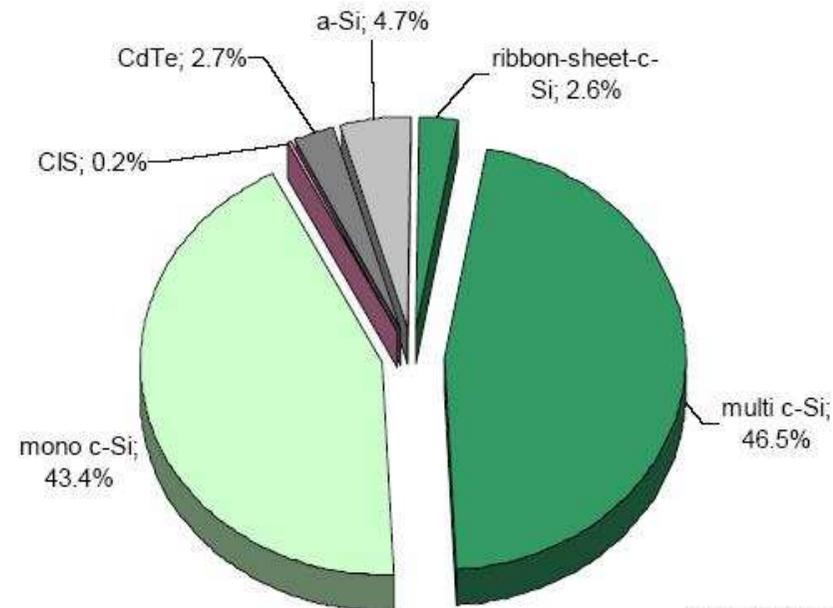
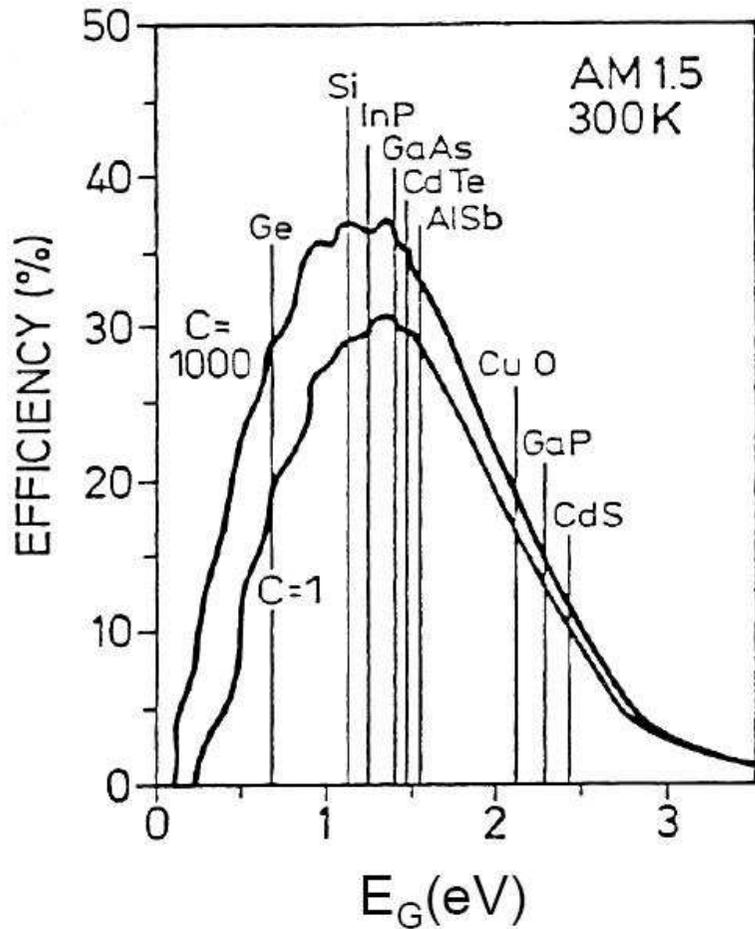
Idee: - Verwendung direkter Halbleiter

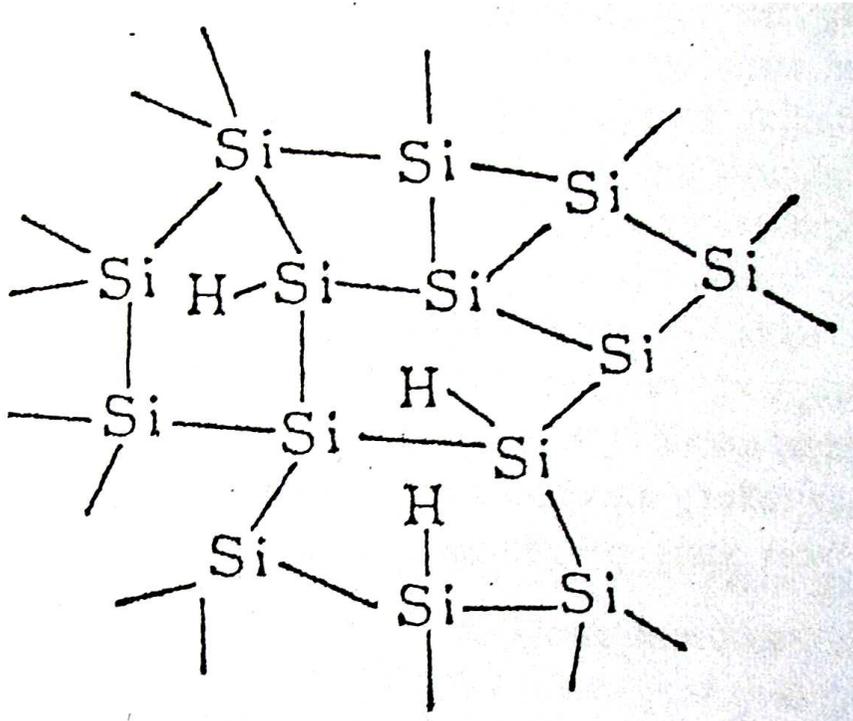
→ nur noch dünne Schichten

Vorteil: - geringer Materialaufwand

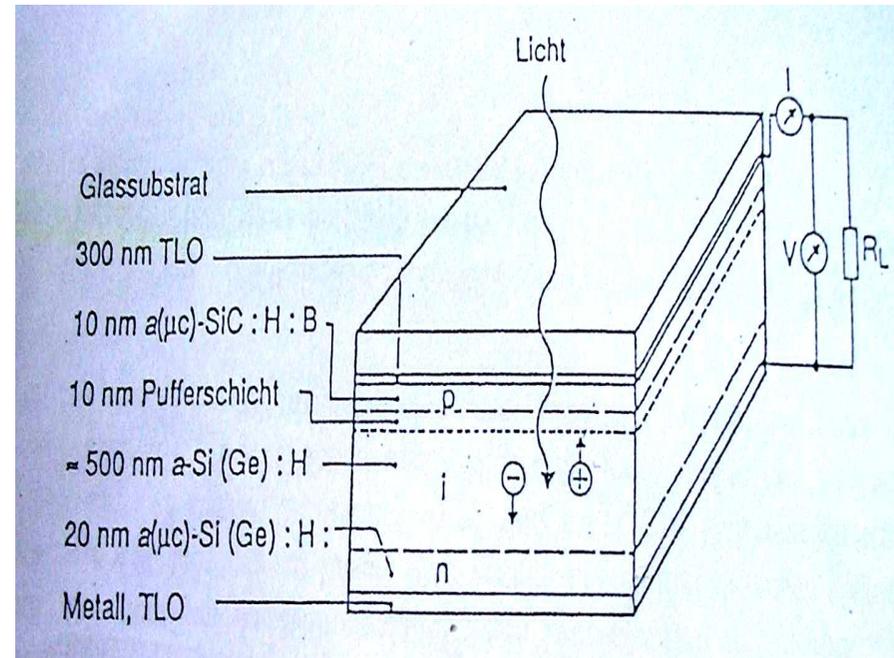
→ Kostenreduzierung

Problem: - geeignetes Substrat notwendig





Atomistische Struktur von amorphem Silizium



Struktur einer  $\alpha$ -Si Zelle mit intrinsischer Schicht

Vorteile: - kostengünstig

- Energierücklaufzeit 2-3 Jahre

- Abscheidung auf günstiges, flexibles Substrat

Nachteil: - bescheidene Wirkungsgrade  
(4-8 % kommerziell)

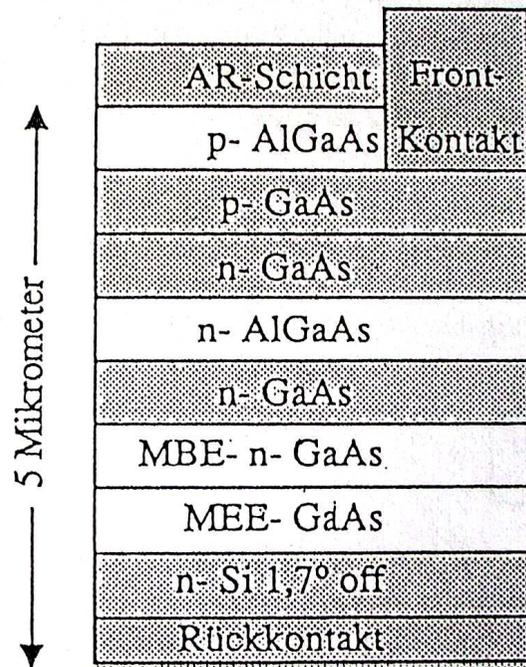


Abb. 8.20 Struktur einer GaAs-Solarzelle auf Substratsilizium

- + Bandabstand optimal (1,42eV)
- + absorbiert 90% des Lichtes in  $2\mu\text{m}$
- + hohe Wirkungsgrade ( $\eta \approx 24\%$ )

- Ga und As toxisch
- kostenintensiv

## Spitzenwirkungsgrade von CIS-Solarzellen und Modulen

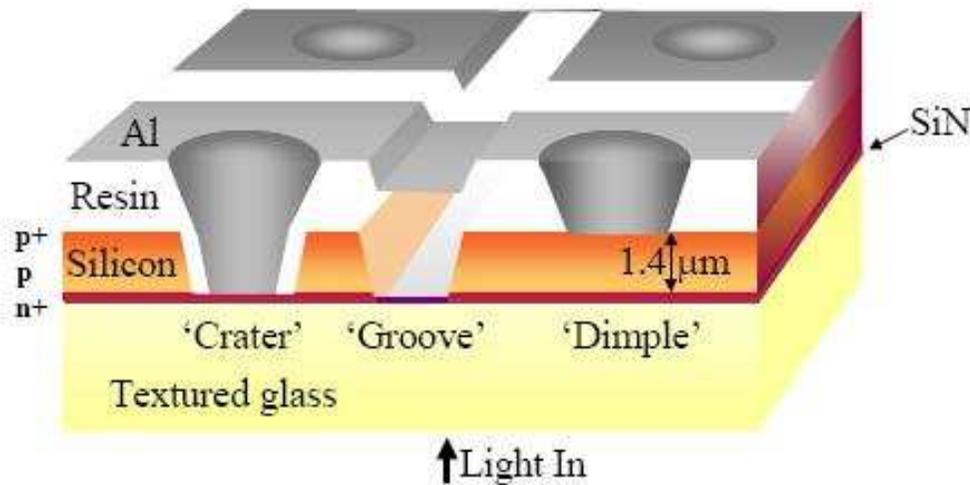
Fläche		Wirkungsgrad [%]	Jahr	Labor /Firma	Bemerkung
Zelle [cm <sup>2</sup> ]	Modul [cm <sup>2</sup> ]				
0,5		19,2	2003	NREL (USA) [3]	3-Stufen-Prozess, Labor
0,5		18,6	2003	NREL/AGU (J) [5]	beste Cd-freie Laborzelle
	16	16,6	2000	ASC (S) [6]	Laborprozesse
	18,9	14,7	1999	S	
	736	12,9	2003	Z	
	864	14,2	2003	S	
	3651	12,1	1999	S	
	4938	13,1	2003	S	
	6507	12,2	2003	V	

Spitzenwirkungsgrade von CIS- Solarzellen und Modu

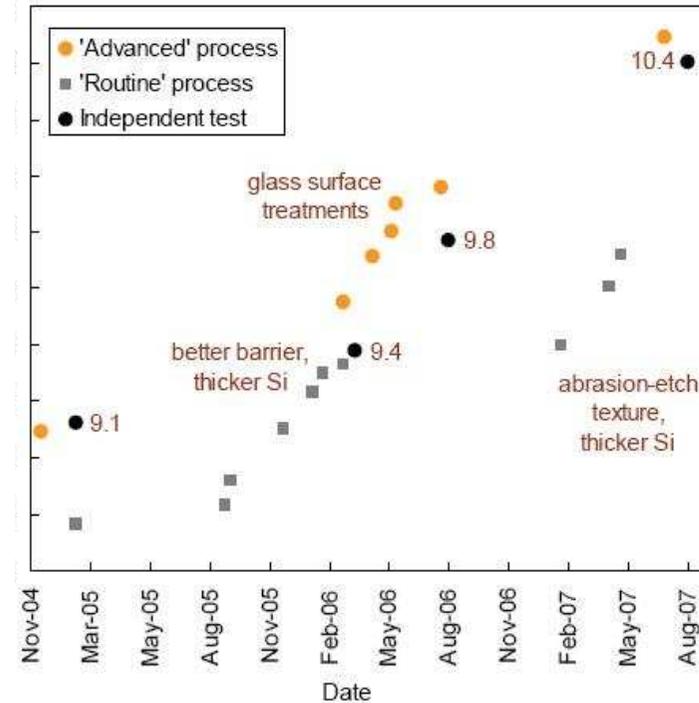
Problem: Indium geht zur Neige



CIGS - Anlage auf einer Schule in Marbach a. N.

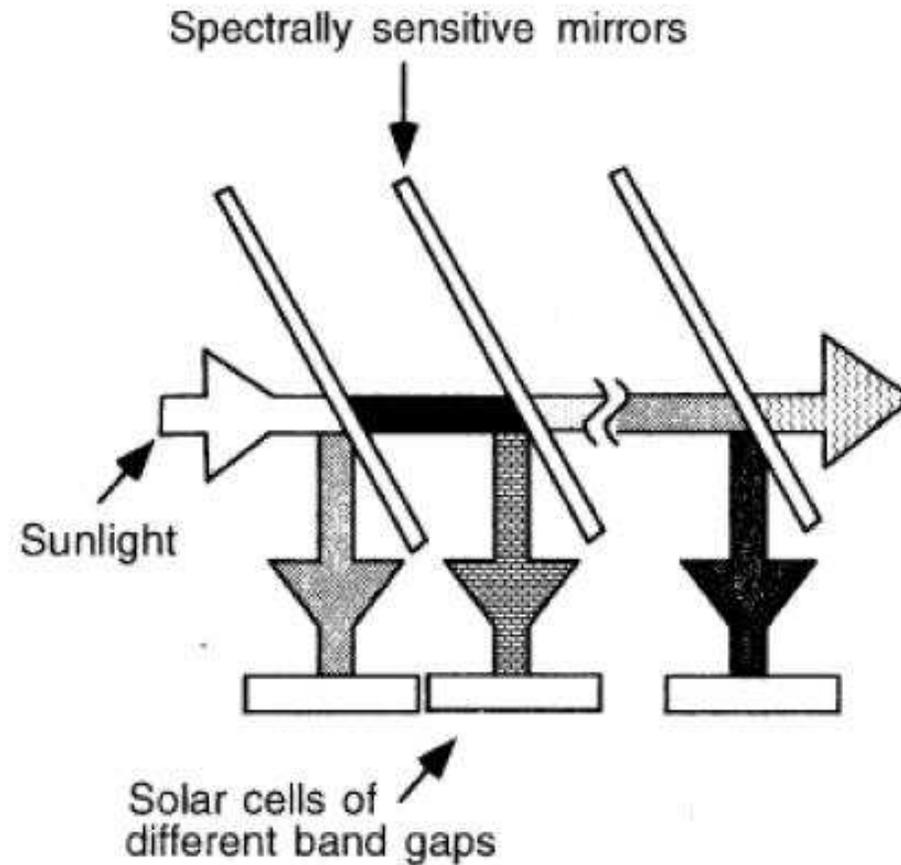
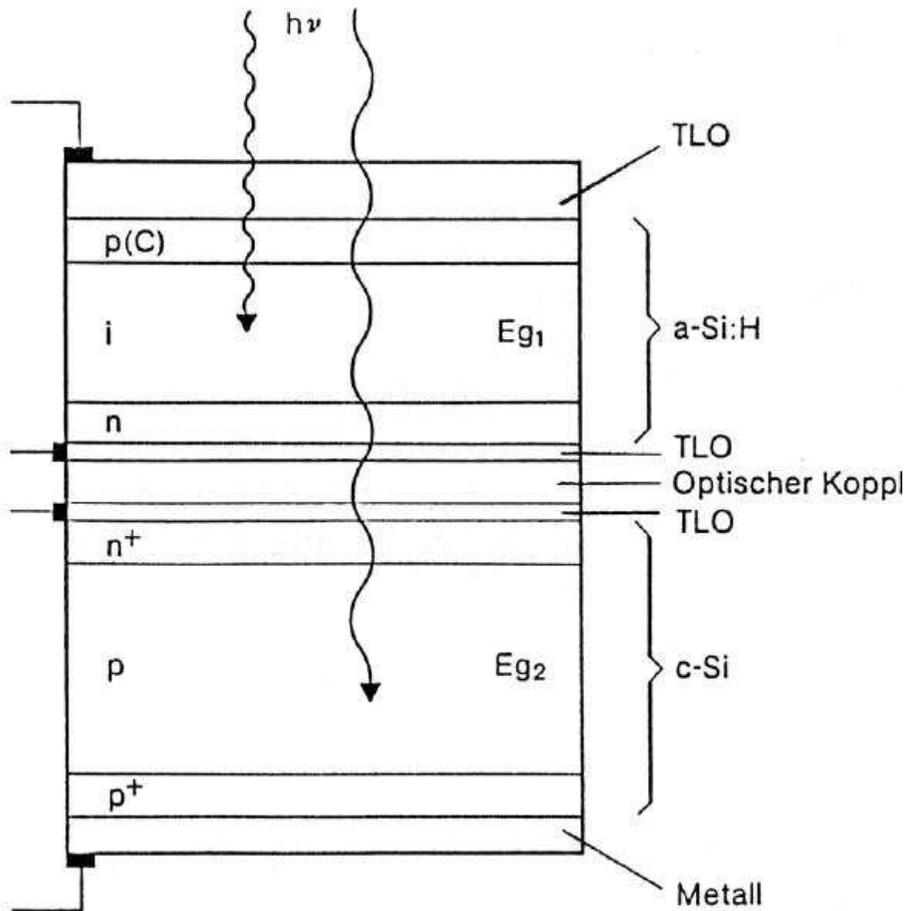


**Figure 2:** CSG device structure.



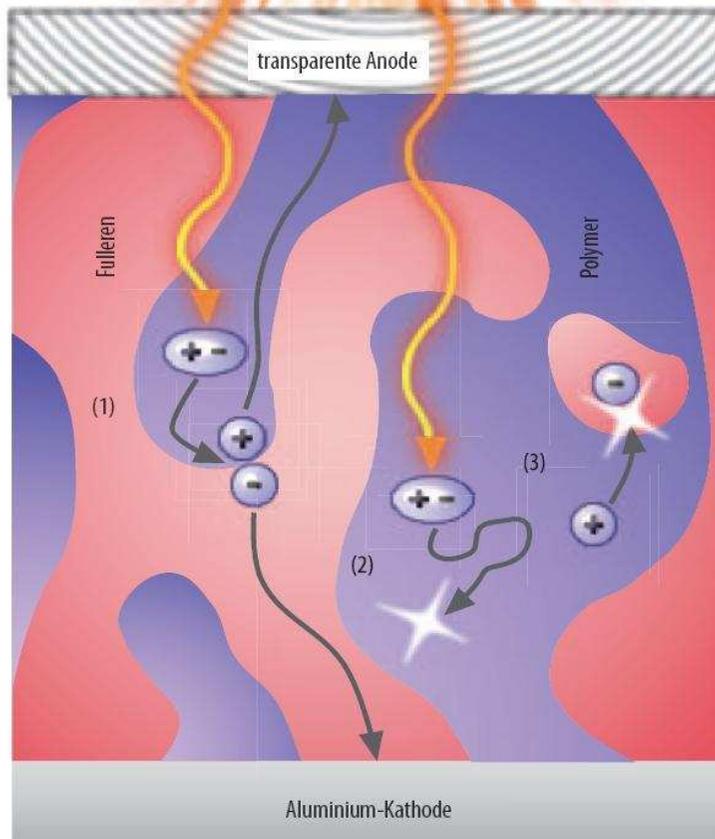
- Silangas wird direkt auf Glas abgeschieden (nur 1,4 μm)
- Laser trennen die Zellen
- Kontakte auf Rückseite

- Energierücklaufzeit 2-3 Jahre
- keine toxischen Stoffe oder Schwermetalle
- keine Degradation in über 30 Jahren



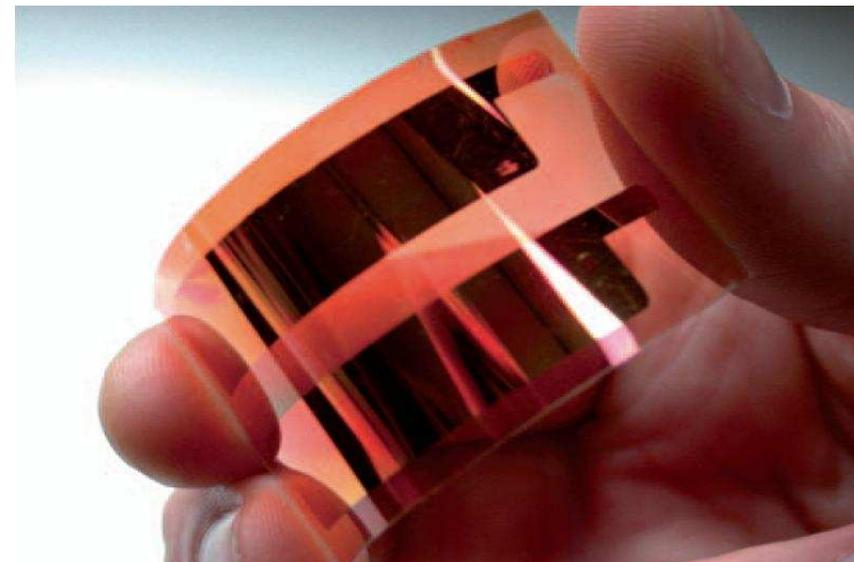
Hintereinanderschalten von Zellen mit unterschiedlichem Bandabstand  
 → Für unendliches Tandem ergibt sich  $\eta \approx 86\%$

02.06.08

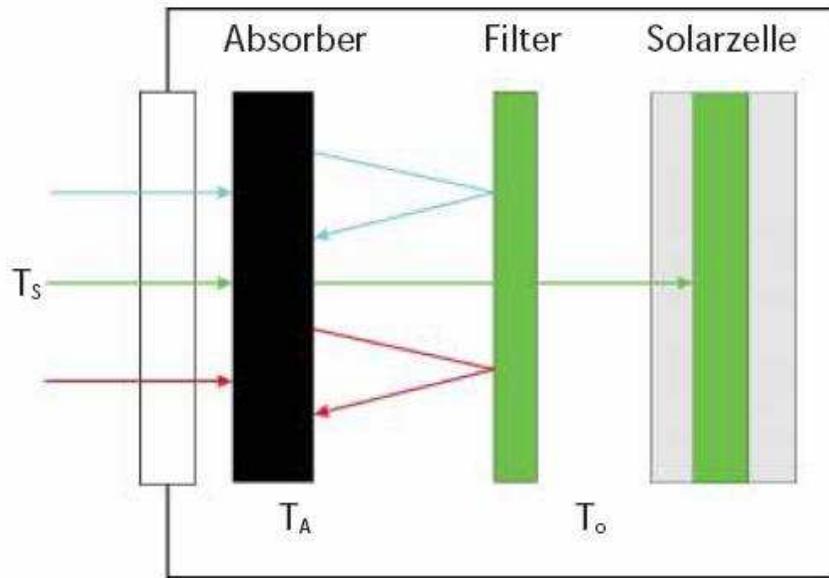


- sehr günstige Materialien
- mechanische Flexibilität → einfache Integration
- keine Entsorgungsproblematik
- Wirkungsgrad nur ca. 5%

- Absorption führt nicht direkt zur Anregung von freien Ladungsträgern
- Es werden Elektron-Loch Paare erzeugt



Polymer- Fulleren-Solarzelle auf flexiblem Substrat



P. Würfel

Theoretischer Wirkungsgrad:  $\eta \approx 85\%$

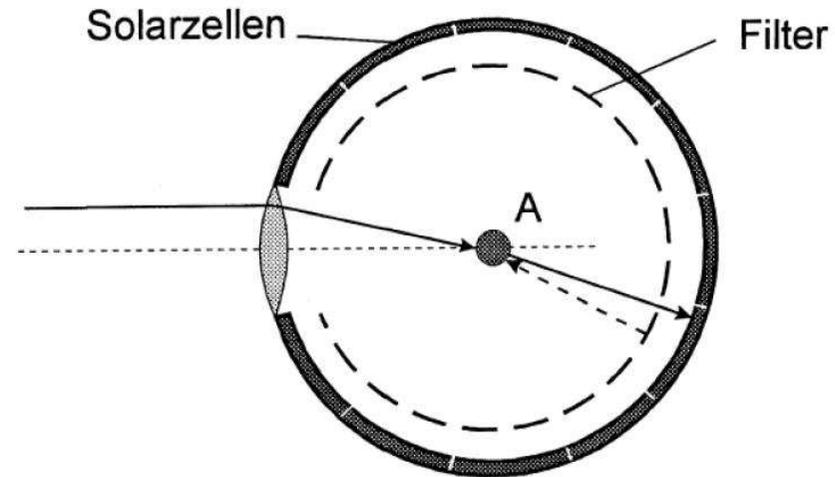
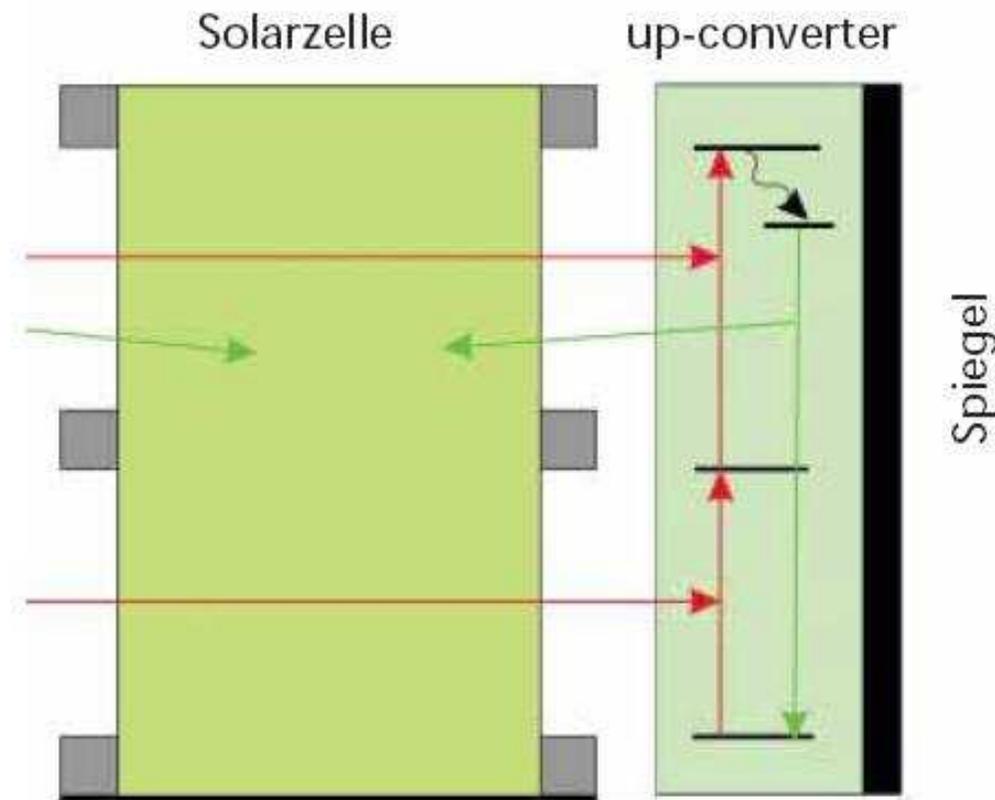


Abb. 8.6 Beim thermo-photovoltaischen Konverter ist der Zwischenabsorber von Solarzellen umgeben, die mit seiner Wärmestrahlung arbeiten.

Probleme: - Absorption im Interferenzfilter  
- thermische Stabilität

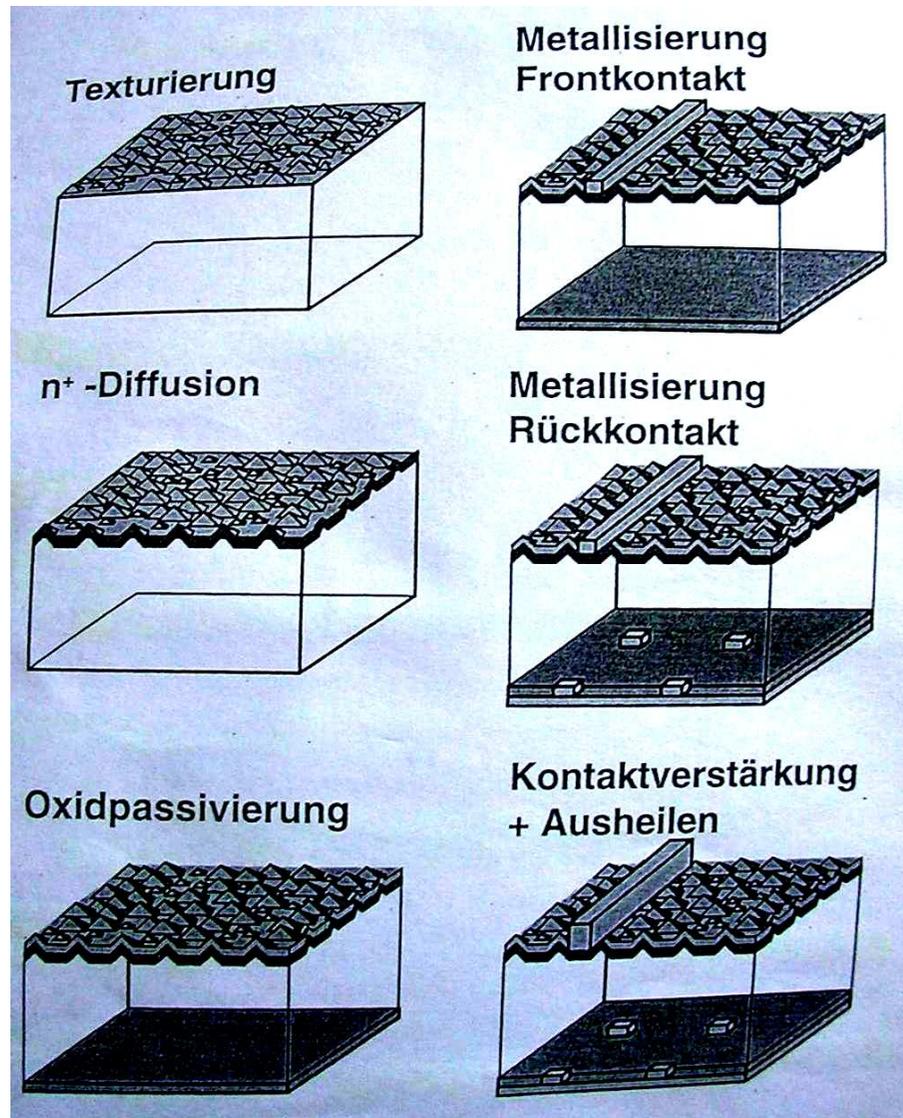
02.06.08



Zwei - Stufen - Absorptionsprozess

- $\eta > 60\%$  für  
konzentriertes Licht
- $\eta > 45\%$  für nicht-  
konzentriertes Licht

## Zusammenfassung Herstellungsprozess:



## Zusammenfassung innovative Konzepte:

### In Benutzung:

- Rückseitenzelle
- Bifacialzelle
- Konzentratorzelle
- Tandemzelle
- Dünnschichtzellen
- CSG Zellen

### In Entwicklung:

- Organische Zellen

### Theoretische Konzepte:

- Thermozellen
- Up/Down Konverter

## Quellen

- [1] A.Goetzberger, B.Voß und J.Knoblauch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner 1997
- [2] Solarenergievorlesung Lichttechnisches Institut Uni Karlsruhe von 2005
- [3] FVS Themen 2003, Dr. Michael Powalla: Dünnschichtsolarzellen auf der Basis von Verbindungshalbleitern
- [4] FVS Themen 2003, Prof. Dr. Peter Würfel: Neue Solarzellenkonzepte
- [5] Physik Journal 05/2008
- [6] TNC Consulting ([www.tnc.de](http://www.tnc.de))
- [7] R. Kohlbauer GmbH ([www.kohlbauer.com](http://www.kohlbauer.com))
- [8] Gebr. Schmid GmbH + Co., Automatisierte Prozessanlagen
- [9] CSG Solar AG ([www.csgsolar.de](http://www.csgsolar.de))
- [10] Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiberg (<http://www.ise.fraunhofer.de>)



# Photovoltaik

---

## Herstellung und innovative Konzepte

Sebastian Illing und Nora Igel

