

6.1. Si-Solarmodul Herstellungssequenz

6.1.1 Herstellung von reinem Silizium

6.1.2 Kristallzuchtverfahren für Si (CZ, FZ, EFG, Blockgießverfahren)

6.1.3 Herstellung von Si-Scheiben

6.1.4 Herstellung von Si-Bändern

6.1.5 Neue Verfahren (EG-Si-SG-Si) und experimentelle Grenzen

6.2 Industrielle Fertigung von Si-Solarzellen (Standard Siebdruck-Solarzelle)

6.3 Hochleistungskonzepte für Si-Solarzellen

6.4 Von der Zelle (Wafer) zum Modul, Modultechnik

6.5 Standardisierte Tests (IEC-Norm)

6.3 Hochleistungskonzepte für Si-Solarzellen

6.3.1 Rolle des Wirkungsgrades

6.3.2 Minimierung rekombinatorischer Verluste

6.3.3 Optische Optimierung

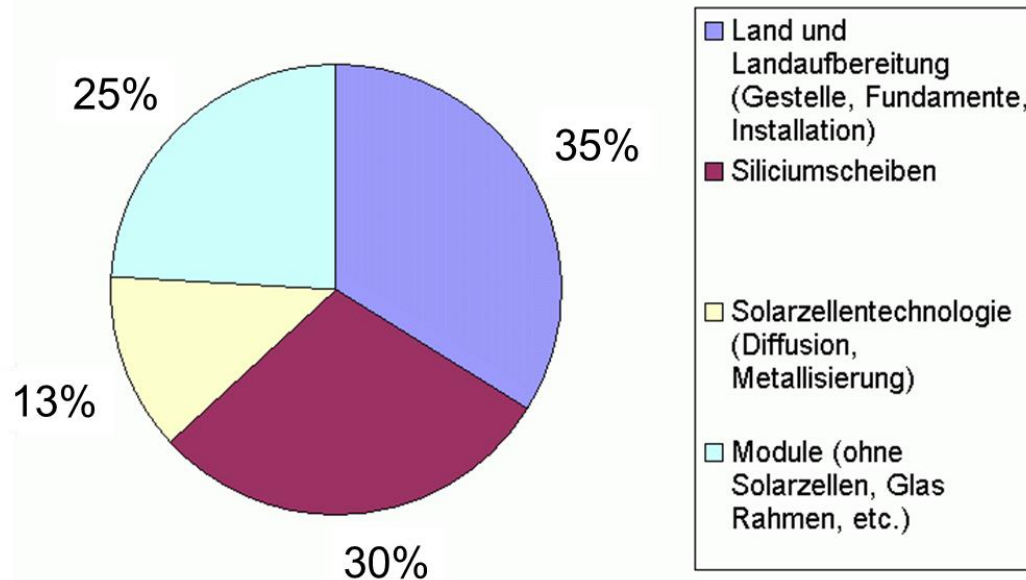
6.3.4 Minimierung ohmscher Verluste

6.3.5 Rückseitenkontaktzellen

Wirtschaftliche Bedeutung hoher Wirkungsgrade

U.Lemmer
PV 6.3.3

Kostenaufteilung eines Solararrays

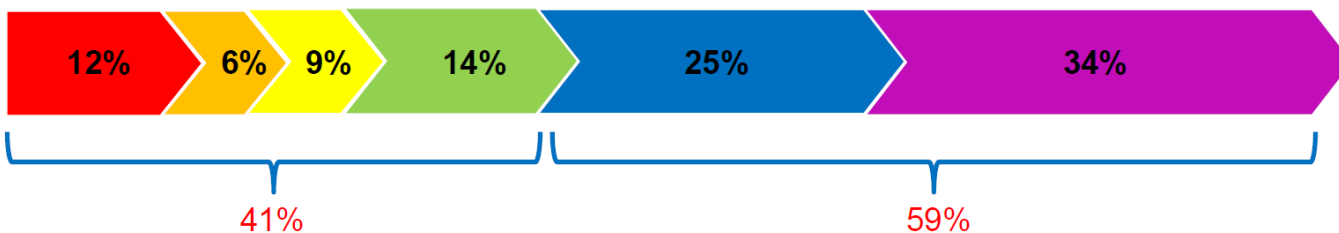


- im wesentlichen
flächenproportionale
Kosten

Quelle: Goetzberger <2000

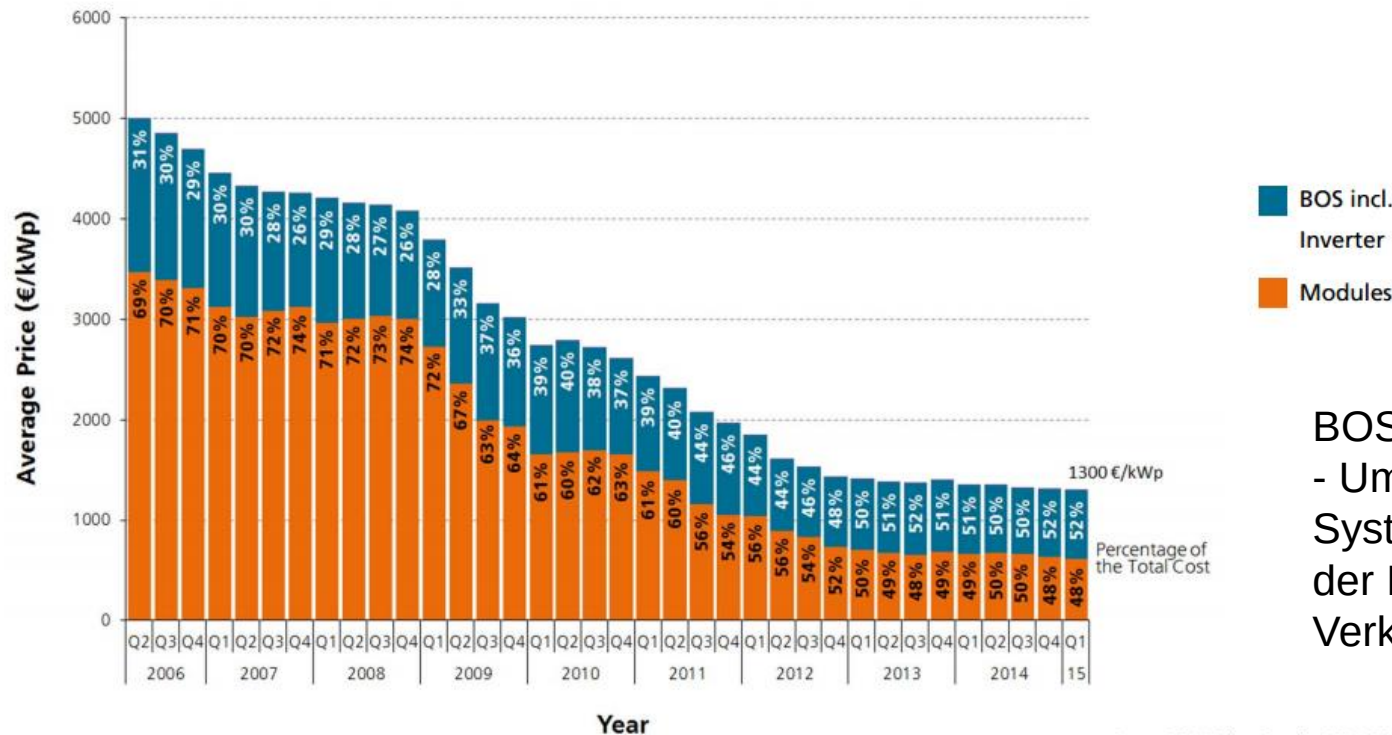


Rough percentages for conventional c-Si:



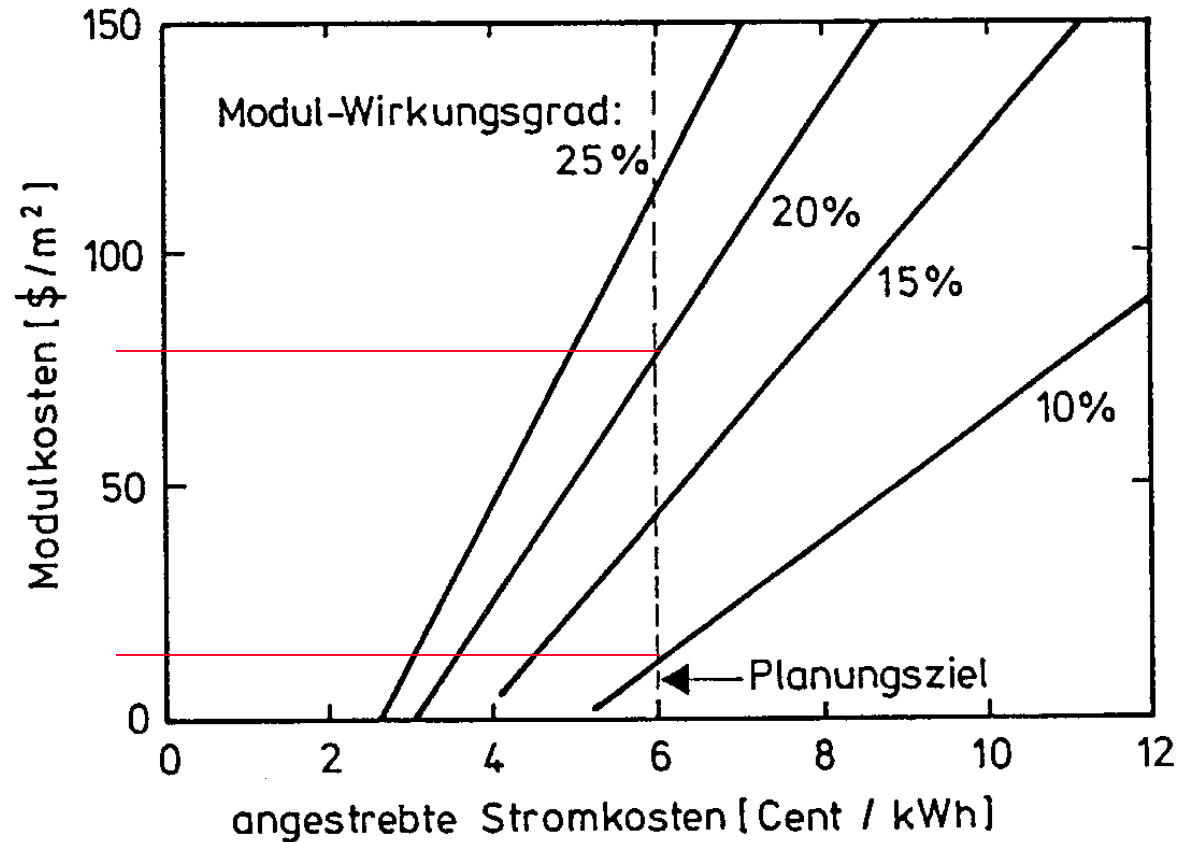
Quelle: Swanson 2011

Average Price for PV Rooftop Systems in Germany (10kWp - 100kWp)



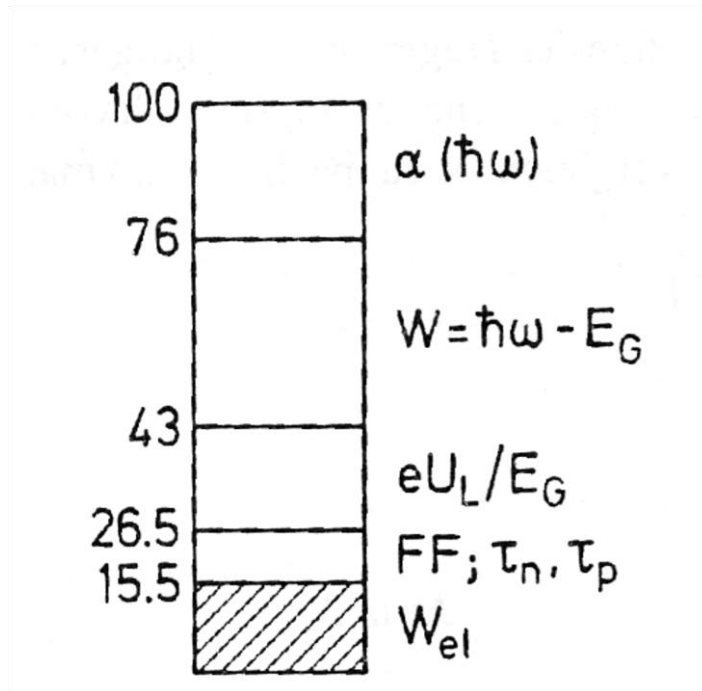
BOS: Balance of System
- Umfasst alle
Systemkomponenten jenseits
der Module (Gestelle,
Verkabelung, Inverter, etc.)

Data: BSW-Solar. Graph: PSE AG 2015

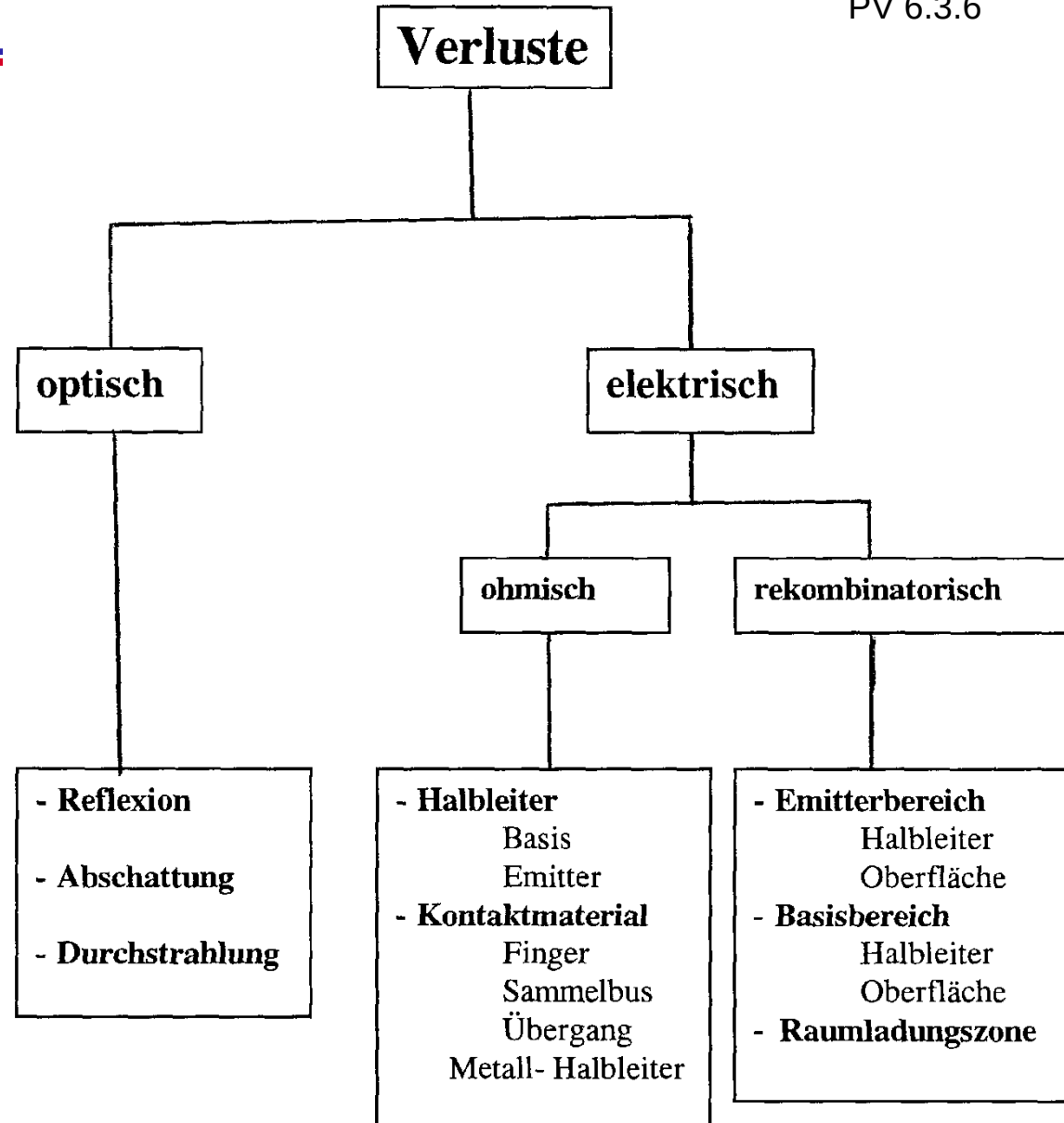


-Verdoppelung des Wirkungsgrades von 10% auf 20 % erlaubt fünffach teurere Module

Wirkungsgraderhöhung

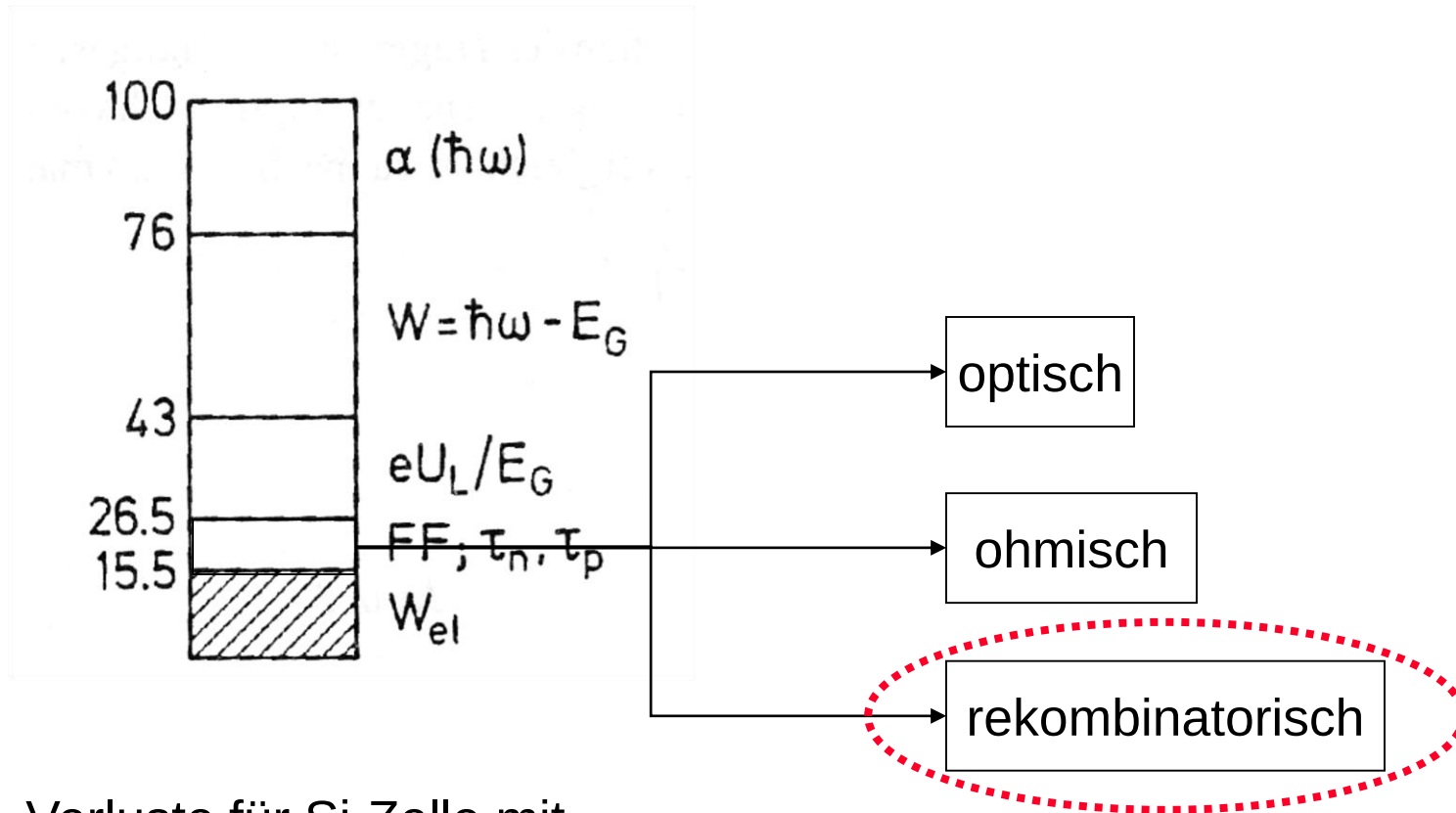


Verluste für Si-Zelle mit
Wirkungsgrad 15.5 %



Verluste einer typischen Si-Solarzelle

U.Lemmer
PV 6.3.7



Verluste für Si-Zelle mit
Wirkungsgrad 15.5 %

6.3 Hochleistungskonzepte für Si-Solarzellen

6.3.1 Rolle des Wirkungsgrades

6.3.2 Minimierung rekombinatorischer Verluste

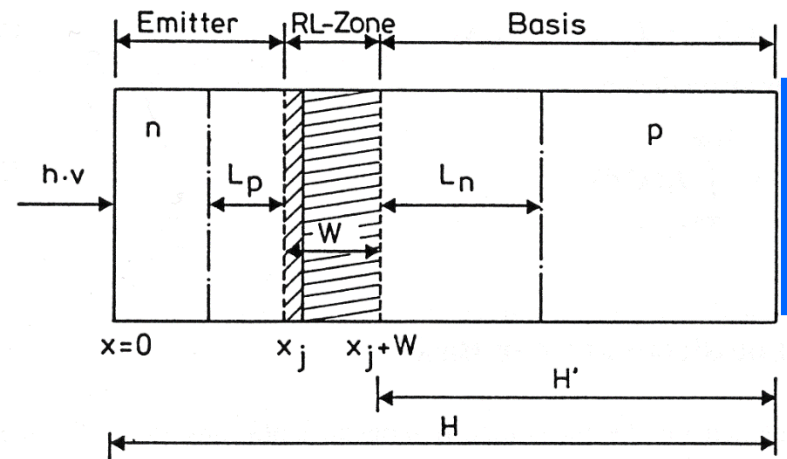
6.3.3 Optische Optimierung

6.3.4 Minimierung ohmscher Verluste

6.3.5 Rückseitenkontaktzellen

Erinnerung: Strom der Solarzelle

$$I_L = I_E + I_{RZ} + I_B$$

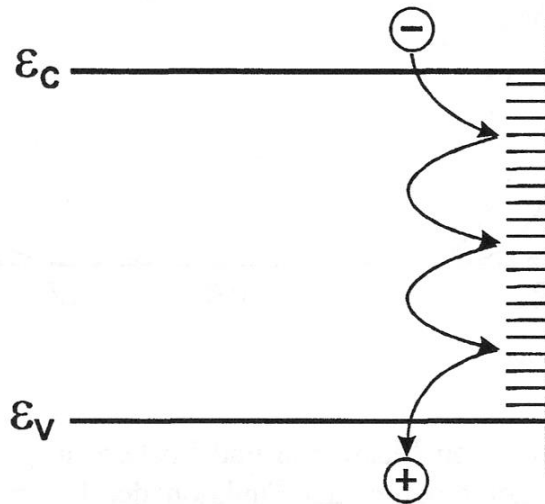


-hoher Basisstrom, wenn in p-Zone generierte Ladungsträger durch Diffusion RZ erreichen → große Diffusionslänge erforderlich

-große Diffusionslänge bedeutet auch, dass photogenerierte Ladungsträger Rückseitenkontakt erreichen können

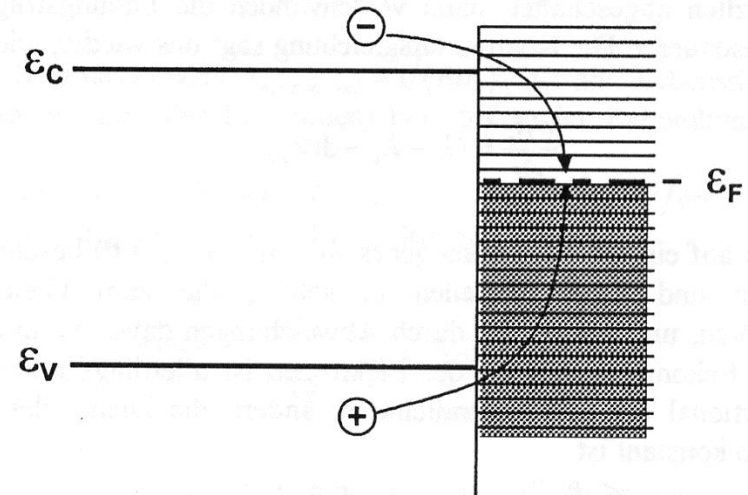
→ unerwünschte Rekombination am Rückseitenkontakt

→ ähnliches (quantitativ aber weniger bedeutsam) gilt für den Frontkontakt



Rekombination über kontinuierlich über der Energie verteilte Oberflächenzustände

Oberflächenrekombination über
Oberflächenzustände

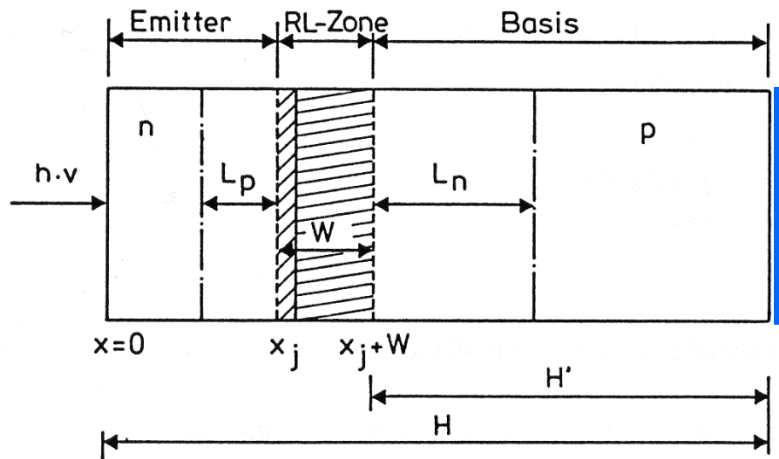


Die Zustandsverteilung am Halbleiter - Metall Kontakt hat eine große Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit zur Folge

Oberflächenrekombination an der
Grenzfläche zum Metall

Einfluß der Oberflächenrekombination

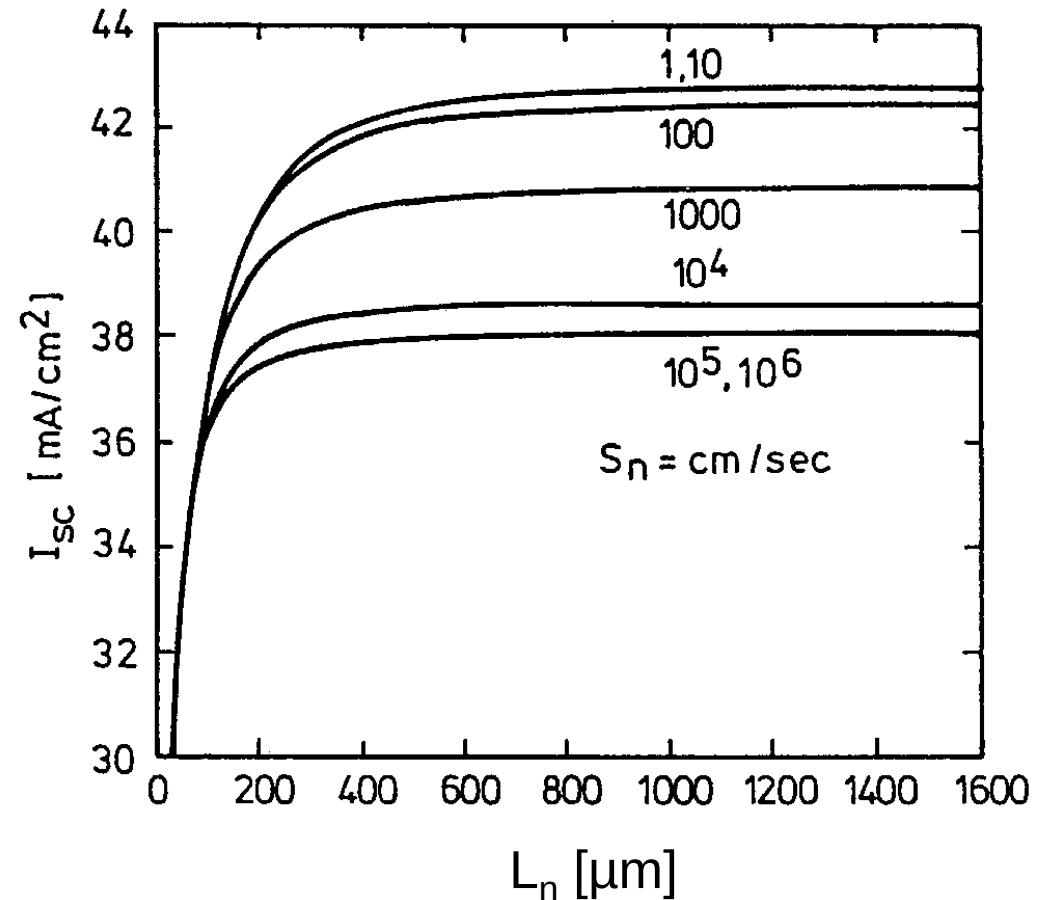
U.Lemmer
PV 6.3.11



$H' \approx 200 \mu\text{m}$

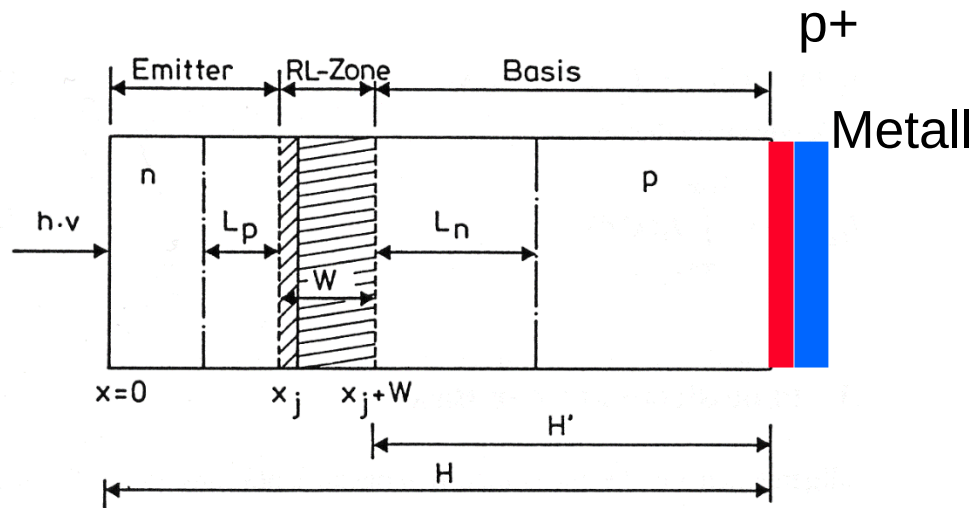
An der Stelle $x=H$:

$$S_n \Delta n = -D_n \frac{d(\Delta n)}{dx}$$



-sofern L_n doppelte Basisdicke übersteigt,
wird I_{sc} durch Oberflächereko. bestimmt

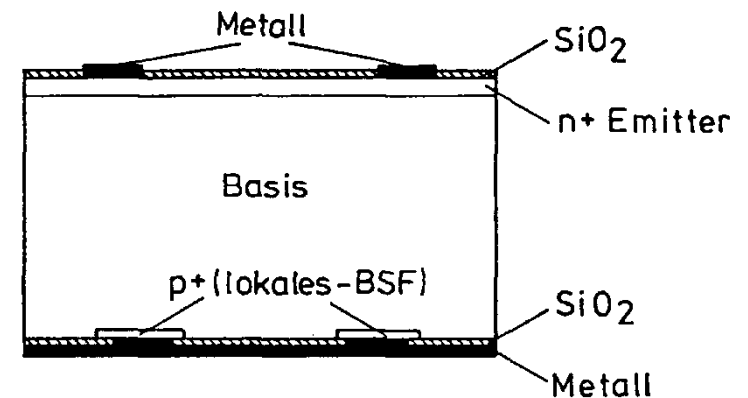
Back-Surface-Field



-Einbau einer sehr hoch dotierten p^+ -Schicht führt zu einem pp^+ -Übergang

resultierendes E-Feld treibt e^- s in Basis zurück (elektrischer Spiegel)

Nichtflächige Kontaktierung/ Passivierung der Oberfläche/BSF



-Reduktion der Kontaktfläche auf $< 5\%$

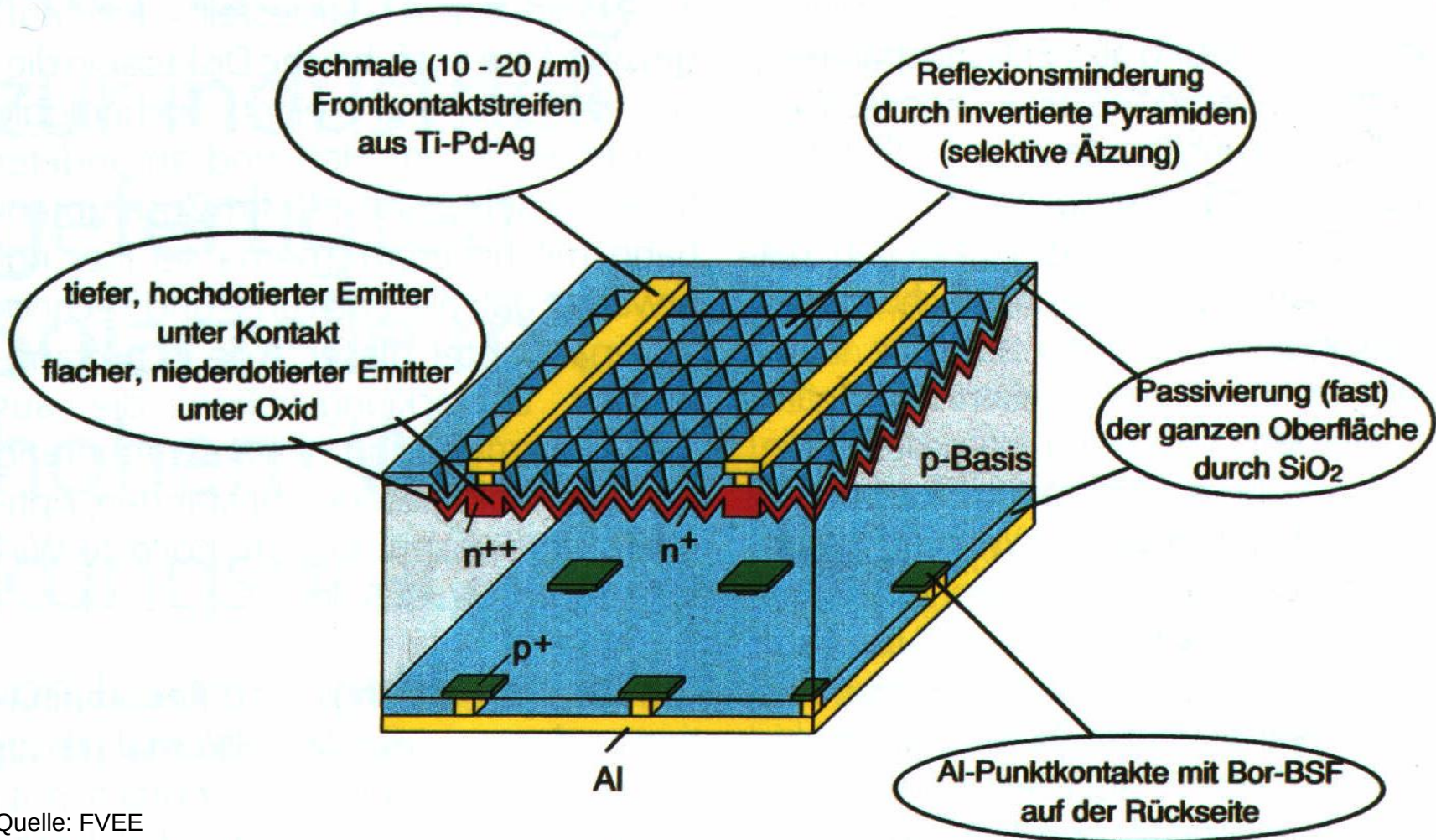
- Reduktion auf $S_n < 100 \text{ cm/s}$

- ebenso Passivierung des Emitters

Passivated emitter with rear locally diffused (PERL) oder auch LBSF (local back surface field)

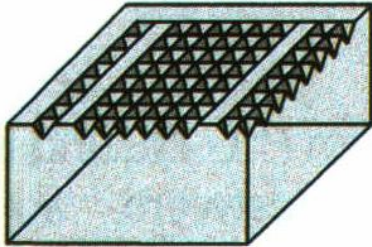
U.Lemmer
PV 6.3.13

Prinzipieller Aufbau

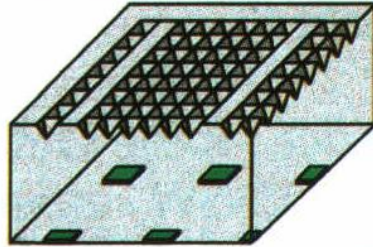


Quelle: FVEE

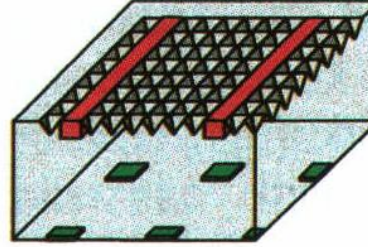
1. Texturierung (M)



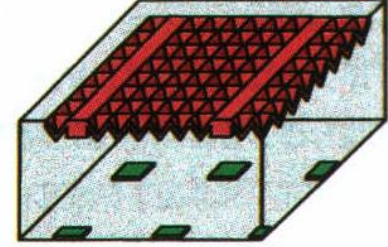
2. Bor-LBSF Diffusion (M)



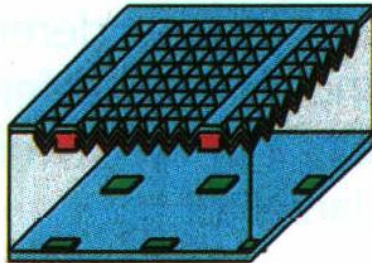
3. n^{++} - Diffusion (M)



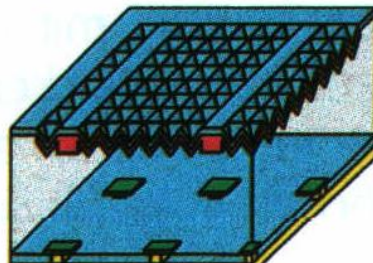
4. n^{+} - Diffusion (M)



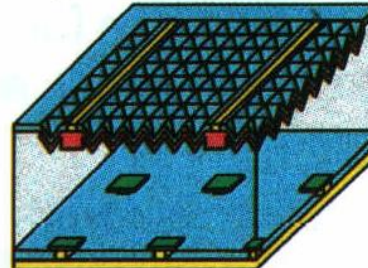
5. Oxidpassivierung



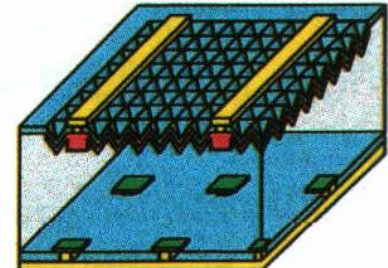
6. Metallisierung (M)
(Rückseite)



7. Metallisierung (M)
(Vorderseite)



8. Kontaktverstärkung,
Annealing



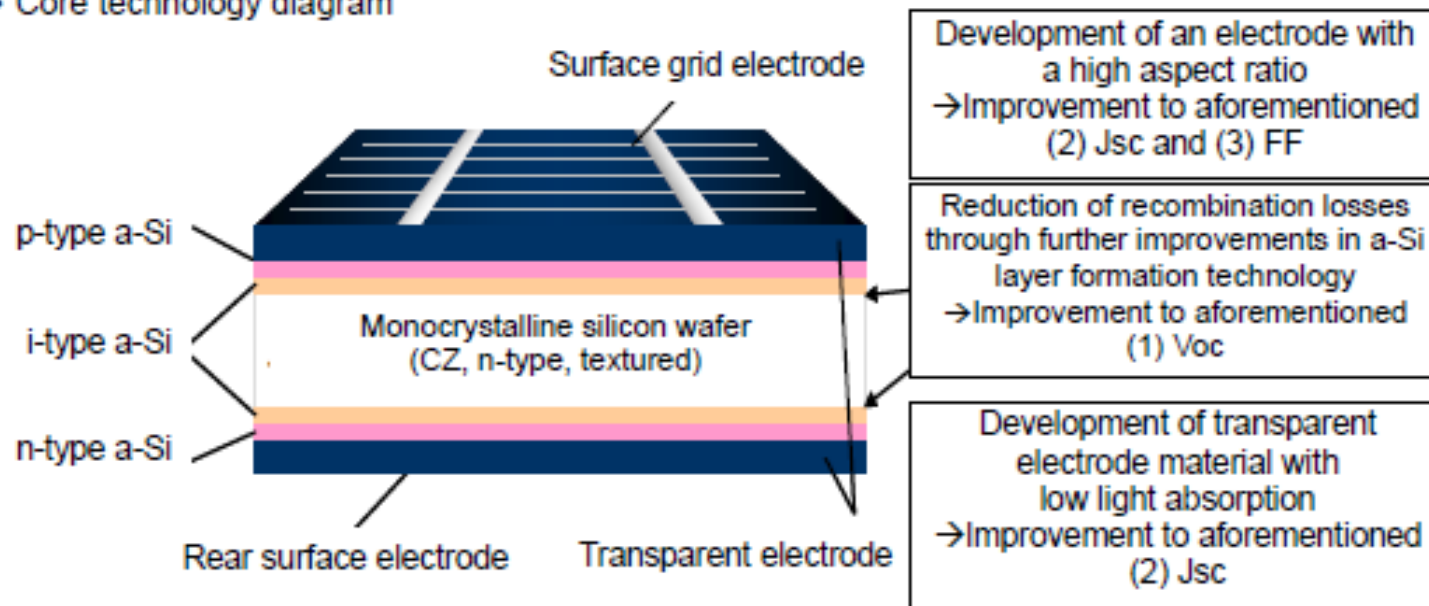
„(M)“ bedeutet Maskierung also (für die Massenfertigung zu aufwändige)
Photolithographie enthalten

HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) Zelle von Sanyo/Panasonic

◆ Properties of HIT solar cells

Open voltage (Voc)	0.750 V
Short-circuit current (Isc) [short-circuit current density (Jsc)] ¹⁷	4.02 A [39.5 mA/cm ²]
Fill factor (FF) ¹⁹	0.832
Cell transfer efficiency	24.7%
Cell surface area	101.8 cm ²

◆ Core technology diagram



HIT Zelle von Sanyo/Panasonic

Heterokontakt a-Si---c-Si

ca. 19.5% Wirkungsgrad, Module bis 17,3% (180W), (Rekordzellen bis 25,6%!!)

100 cm² thin wafer < 200 µm

Aufbau (TCO, p-i a-Si, n-c-Si/wafer, i-n a-Si, TCO, Ag screen printing

Modul 96 Zellen, 190 W; 18,3%/Zelle; Modul 16,2 %

HIT -0,33 % / °C / pin -0,45 % / °C !

Bifaciales Konzept

Multimegawatt-Fertigung

Bei der HIT-Solarzelle von Sanyo wird das sehr gute Absorptionsvermögen und die passivierende Wirkung des amorphen Siliziums mit den guten elektronischen Eigenschaften von monokristallinem Silizium kombiniert.

Der Emitter besteht aus einer sehr dünnen amorphen Silizium-Schicht während die Basis aus einem (n-leitenden) monokristallinem Silizium-Wafer besteht.

6.3 Hochleistungskonzepte für Si-Solarzellen

6.3.1 Rolle des Wirkungsgrades

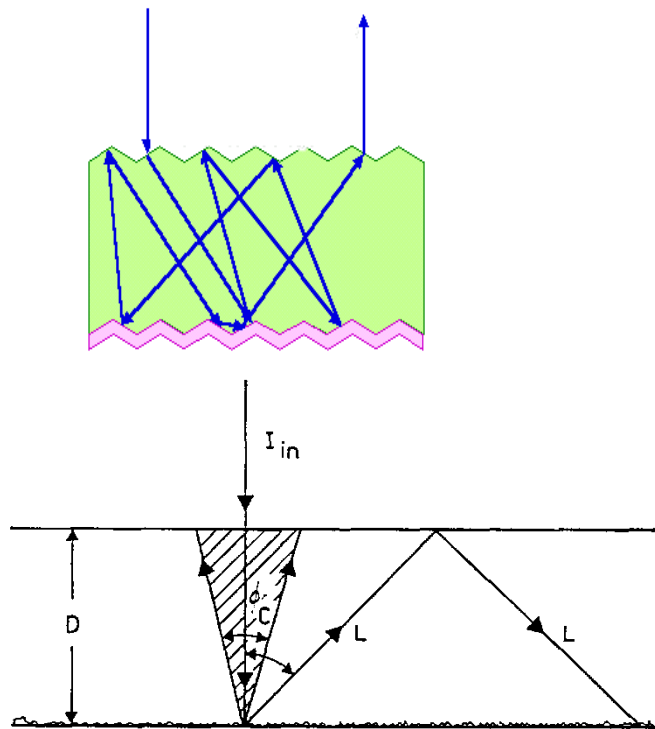
6.3.2 Minimierung rekombinatorischer Verluste

6.3.3 Optische Optimierung

6.3.4 Minimierung ohmscher Verluste

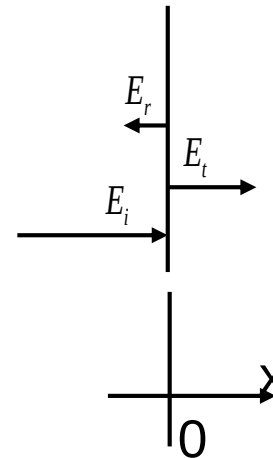
6.3.5 Rückseitenkontaktzellen

Geometrische Erwägungen



- Spiegelung am Rückseitenkontakt
- besser: diffuse rückseitige Reflexion
- „light trapping“

Reflexion an einem Brechungsindexsprung



$$R = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2$$

Bsp.: Si-Oberfläche

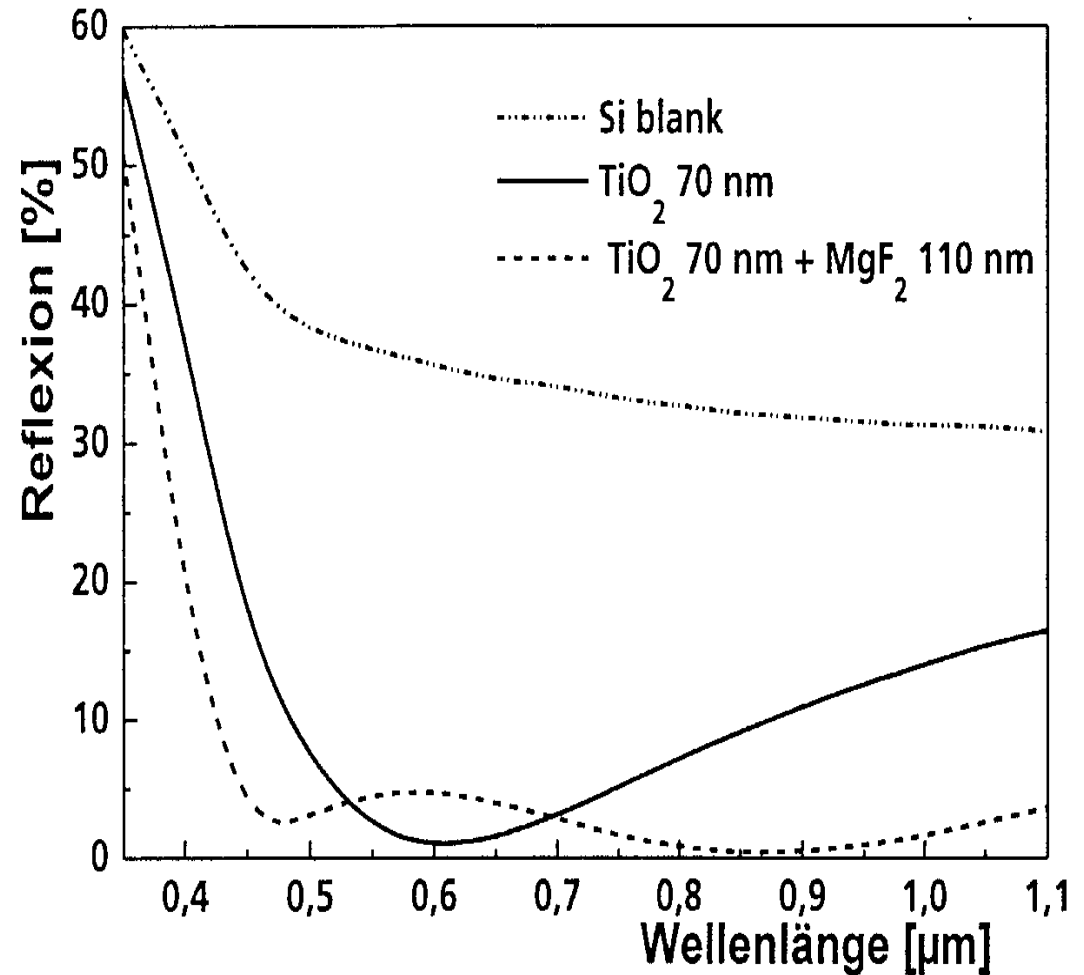
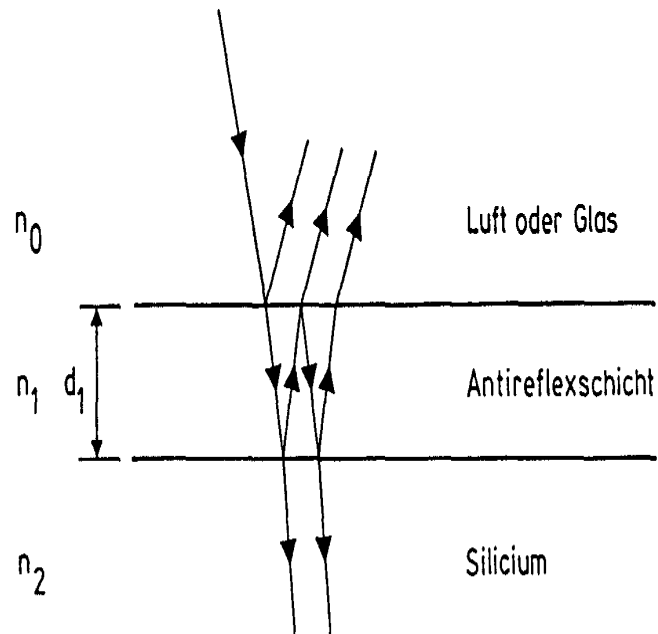
$\lambda = 600 \text{ nm} \rightarrow n \approx 4$

$$R = \left| \frac{1 - 4}{1 + 4} \right|^2 = 0.36 \rightarrow 36 \% \text{ Reflexion !!}$$

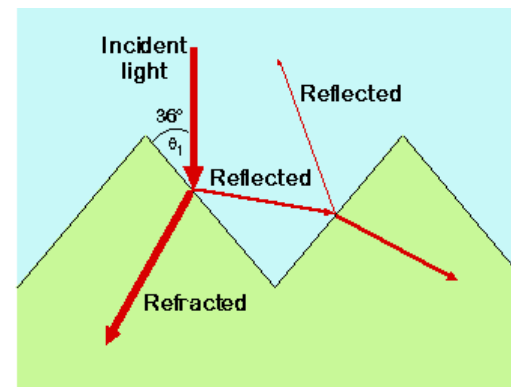
Minimierung von optischen Verlusten

U.Lemmer
PV 6.3.19

Reduktion der Reflexionsverluste durch optimierte Antireflexschichten:



-Herstellung von invertierten
Pyramiden durch spezielle
Ätzprozesse



Reduktion der Gesamtreflexion
von AM 1,5 Strahlung:

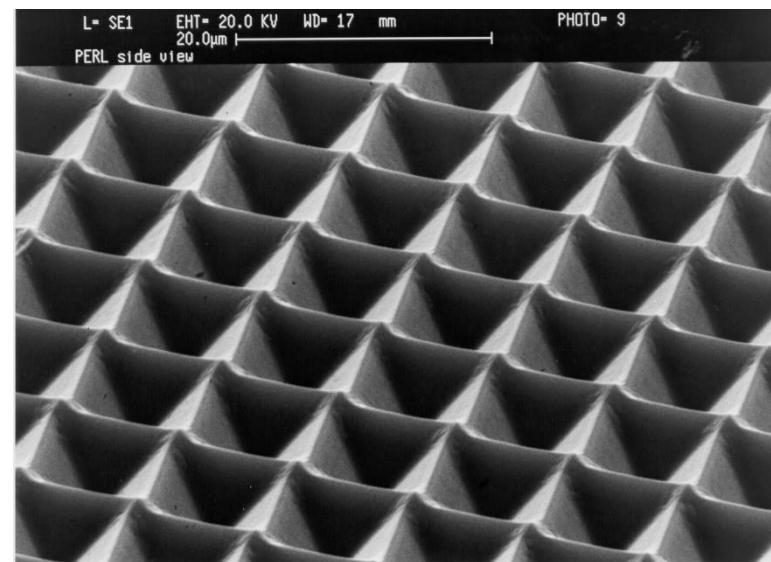
35 % („nacktes“ Si)

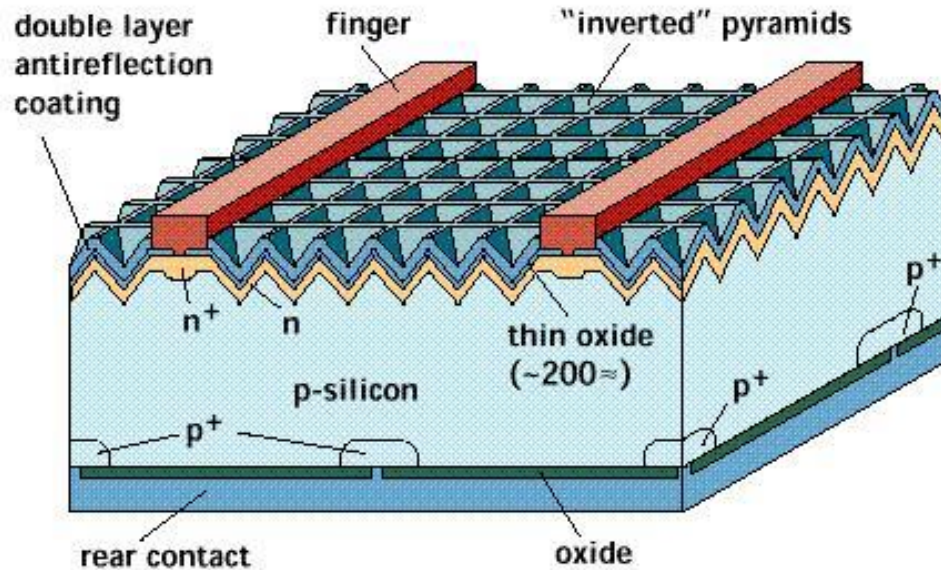


10 % (Texturierung)



3 % (AR-Beschichtung)

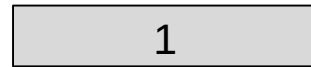




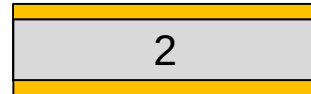
25 %-Zelle (U of New South Wales, Australien)

- extrem reines einkristallines Silizium
- strukturierte Oberfläche und AR-Beschichtung
- dünne Finger aus Ag
- passivierte Emitterseite
- emitterseitige Punktkontakte mit Hochdotierung

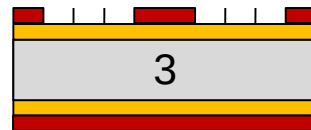
I Herstellung Invertierter Pyramiden



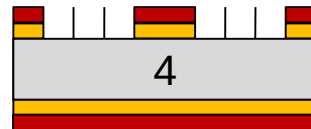
cleaning with organic and anorganic solvents



grow mask oxide of 200 nm thickness at 1110 °C



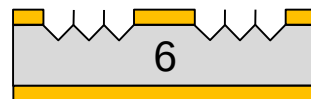
photolithography (spin on resist, illuminate, develop)



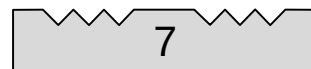
oxide etching with buffered HF



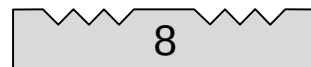
strip photoresist



etch inverted pyramids with anisotropic etch (KOH)



remove oxide with HF

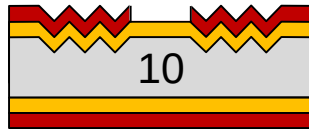


round off inverted pyramids in isotropic etch to remove sharp edges

5:1:1 $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}$ //10'
Oxyd: Entfernen von SiO_2 mit HF Dip
20:1 $\text{H}_2\text{O}:\text{HF}$ //15''
Ionenentfernung: 6:1:1
 $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}$ //10'



RCA-cleaning;
grow mask oxide of 200 nm thickness at 1100 °C



photolithography (spin on resist, illuminate, develop)



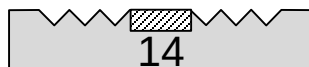
oxide etching with buffered HF



strip photoresist; RCA-cleaning



n⁺-contact diffusion at 900 °C to 20 Ω/□



etch off oxide with HF

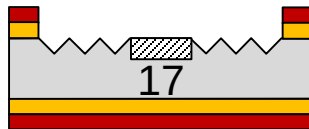
Emitter Herstellung: Diffusion



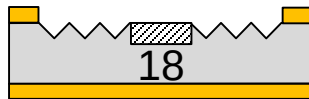
RCA-cleaning;
grow mask oxide of 200 nm thickness at 1100 °C



photolithography (spin on resist, illuminate, develop)



oxide etching with buffered HF



strip photoresist; RCA-cleaning



n-type emitter diffusion at 850 °C to 200 $\Omega/\square$



etch off oxide with HF



photolithography (spin on resist, illuminate, develop)



evaporate Al (p-type dopant) for point contacts



lift-off; strip photoresist; RCA-cleaning



grow high quality oxide of 100 nm thickness at 1000 °C
for passivation of surfaces and as antireflecting coating



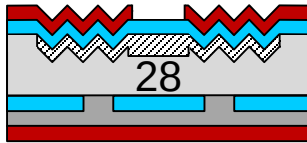
spin on resist to protect front side during
evaporation in step 26



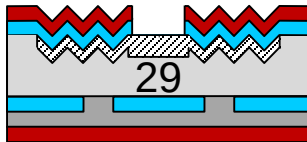
evaporate Al for back side metallization



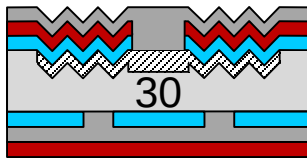
sinter back side metallization at 400 °C in forming gas



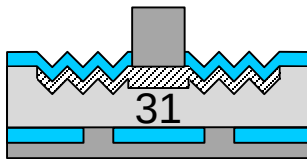
photolithography (spin on resist, illuminate, develop)



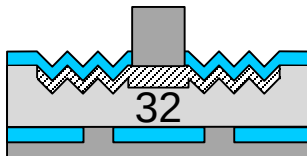
oxide etching with buffered HF



evaporate Ti/Pd/Ag for front side metallization



lift-off metal;
increase thickness of Ag by galvanic deposition



sinter front side metallization at 400 °C in forming gas

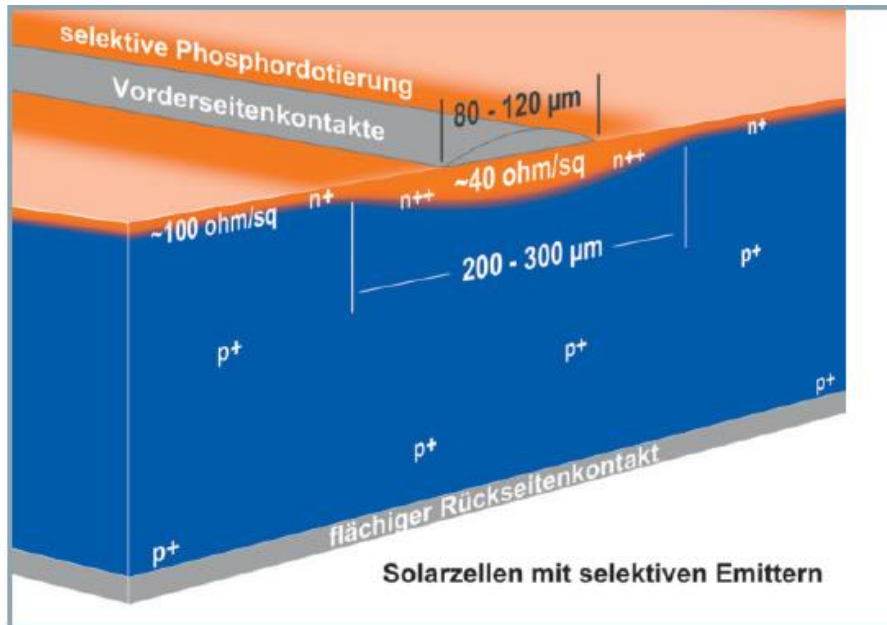
Selektiver Emmitter Konzept

Erhöhte Dotierung unter der Vorderseitenkontakte **ohne** Photolithographie

Vermeidung von Ätzschritten und Maskierungsschritten durch

→ Laser: selektive Erwärmung der P-Paste

→ Streifenförmiges Printen



→ kleiner Kontaktwiderstand, hohe
Blauempfindlichkeit

Quelle: <http://files.hanser.de/hanser/statisch/fz/lpro/LM110010.pdf>

→ Spitzen-Wirkungsgrad von 19,2 Prozent basieren auf monokristallinem Wafermaterial (Czochralski Ziehverfahren) mit konventioneller siebgedruckter Aluminium-Rückseite (26.04.2011 | Quelle: Sunrise Global Solar Energy | solarserver.de © Heindl Server GmbH)

Si Champions: Stand Mai 2015

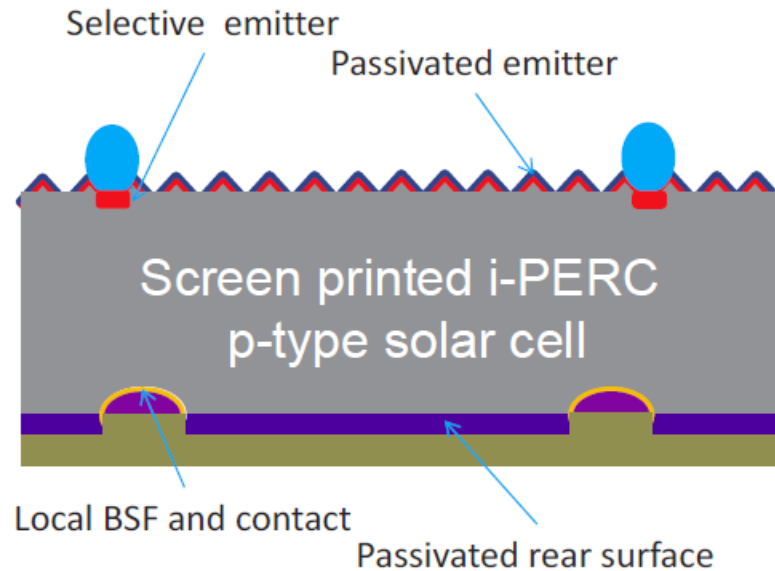


Table I: Measured parameters of champion Mono-crystalline silicon i-PERC solar cell

Area (cm ²)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	Efficiency (%)
244.11	672.1	39.65	80.31	21.40

Table II: Measured parameters of champion Multi-crystalline silicon i-PERC solar cell

Area (cm ²)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	Efficiency (%)
243.89	663.6	39.03	80.26	20.76

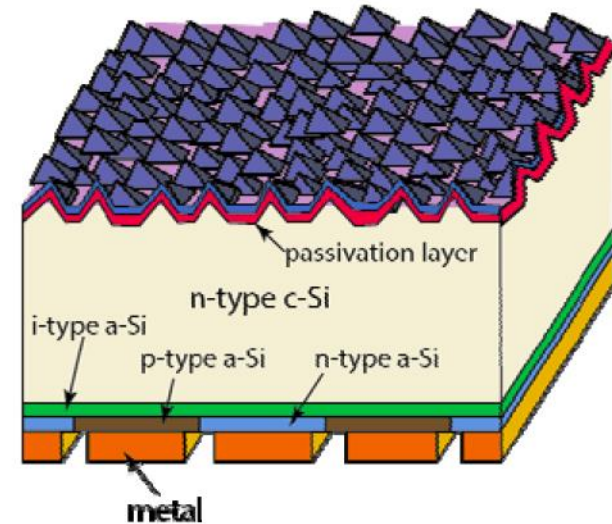


Fig. 3 Schematic of 25.6% efficient rear-junction heterojunction cell.

Quelle: PVSEC 2014

6.3 Hochleistungskonzepte für Si-Solarzellen

6.3.1 Rolle des Wirkungsgrades

6.3.2 Minimierung rekombinatorischer Verluste

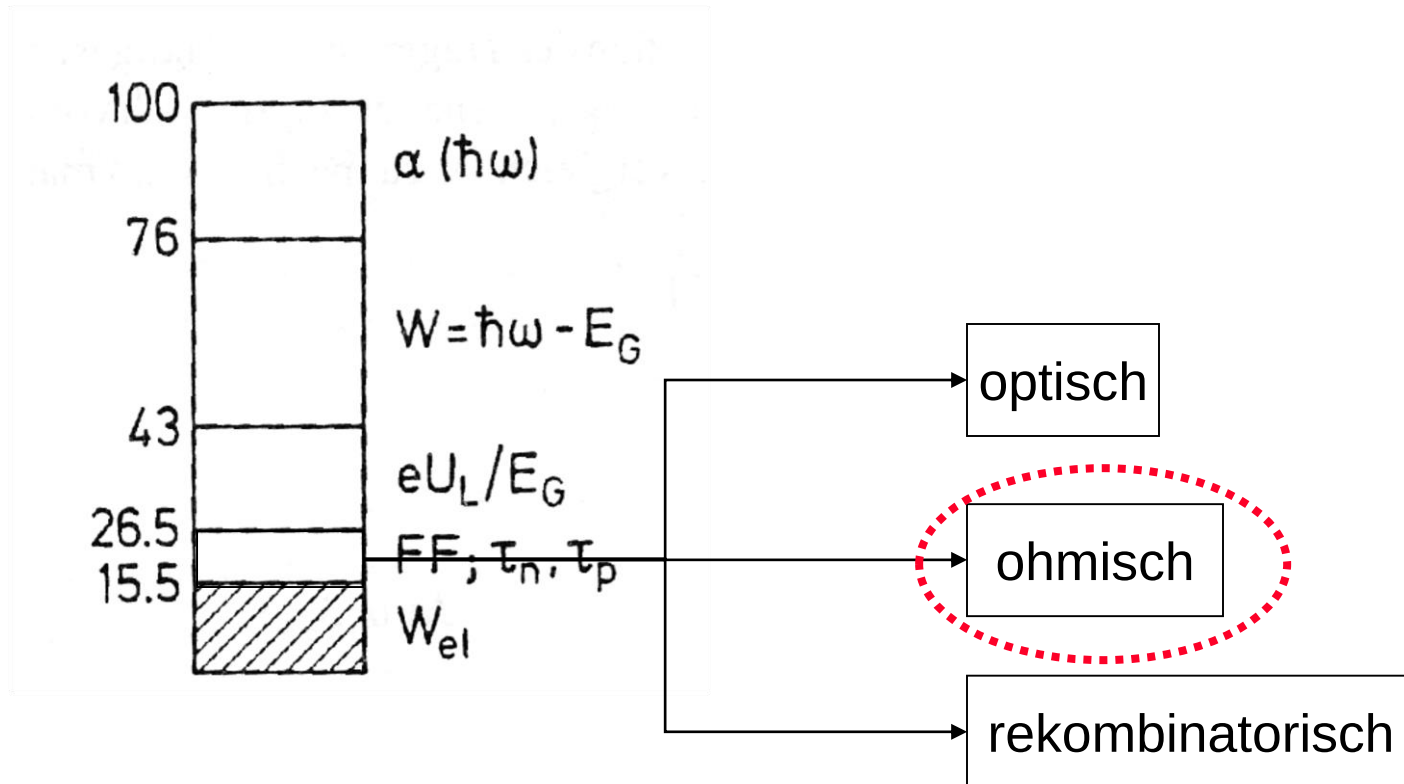
6.3.3 Optische Optimierung

6.3.4 Minimierung ohmscher Verluste

6.3.5 Rückseitenkontaktzellen

Verluste einer typischen Si-Solarzelle

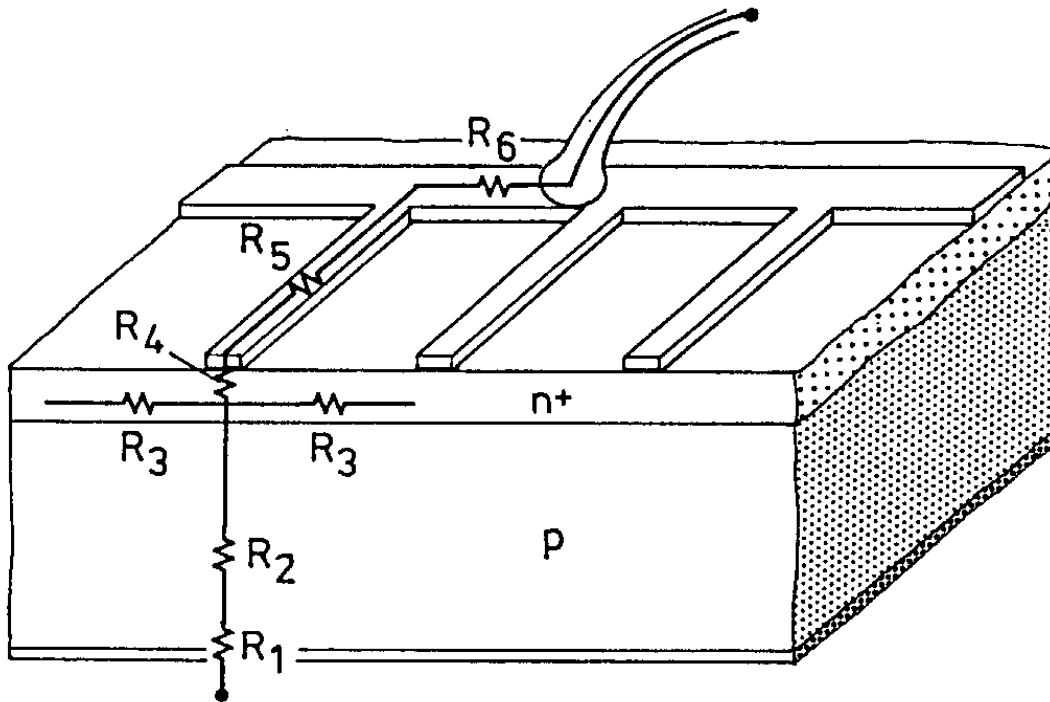
U.Lemmer
PV 6.3.31



Verluste für Si-Zelle mit
Wirkungsgrad 15.5 %

Minimierung von Ohmschen Verlusten

U.Lemmer
PV 6.3.32



R_1 : Widerstand Metall-Halbleiter-Kontakt Rückseite

R_2 : Widerstand der Basis

R_3 : Lateralwiderstand Emitter

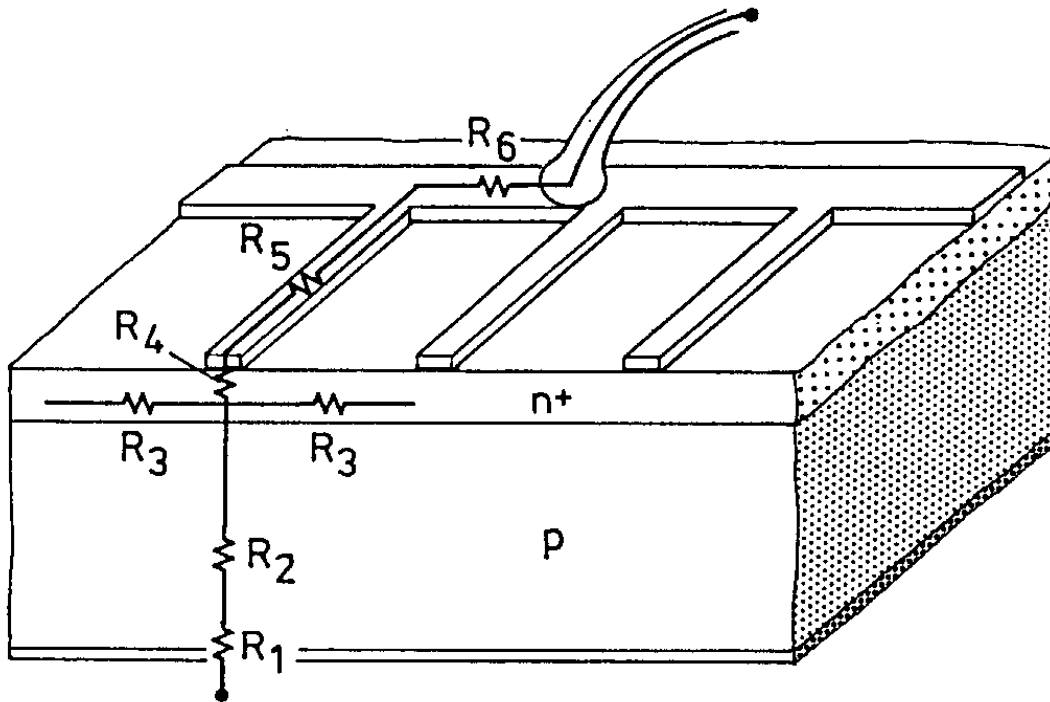
R_4 : Widerstand Metall-Halbleiter Kontakt am Gitterfinger

R_5 : Widerstand Gitterfinger

R_6 : Widerstand Sammelbus

Minimierung von Ohmschen Verlusten

U.Lemmer
PV 6.3.33



R_1 : Widerstand Metall-Halbleiter-Kontakt Rückseite

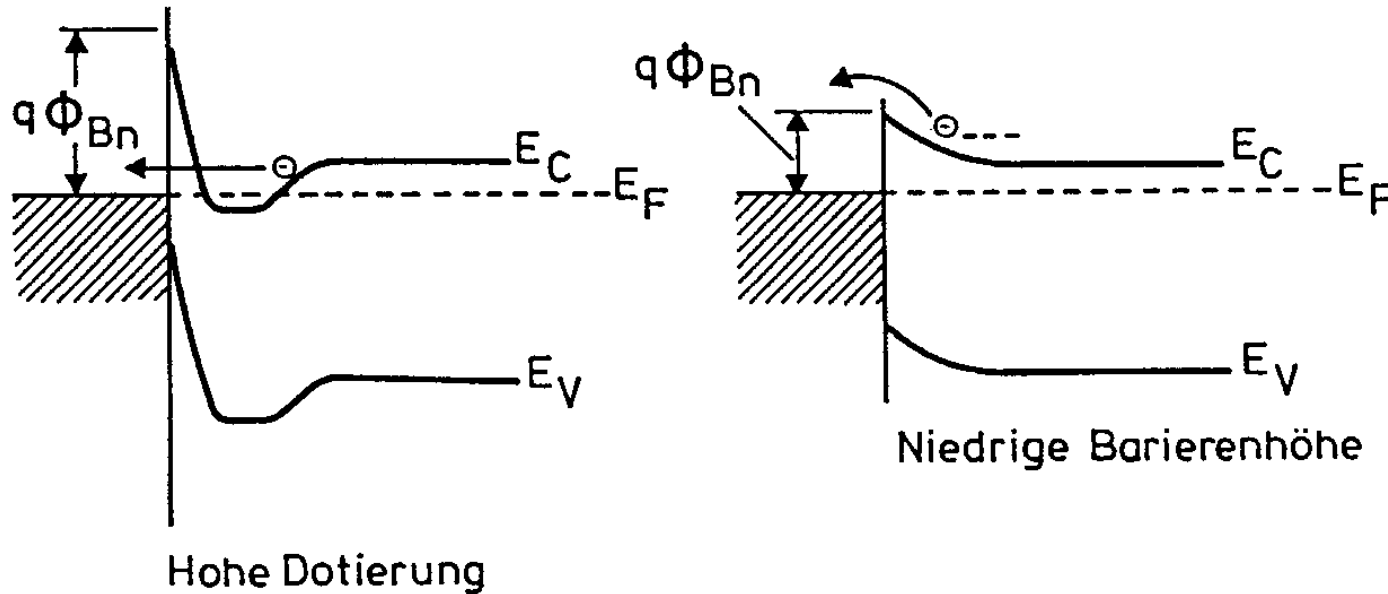
R_2 : Widerstand der Basis

R_3 : Lateralwiderstand Emitter

R_4 : Widerstand Metall-Halbleiter Kontakt am Gitterfinger

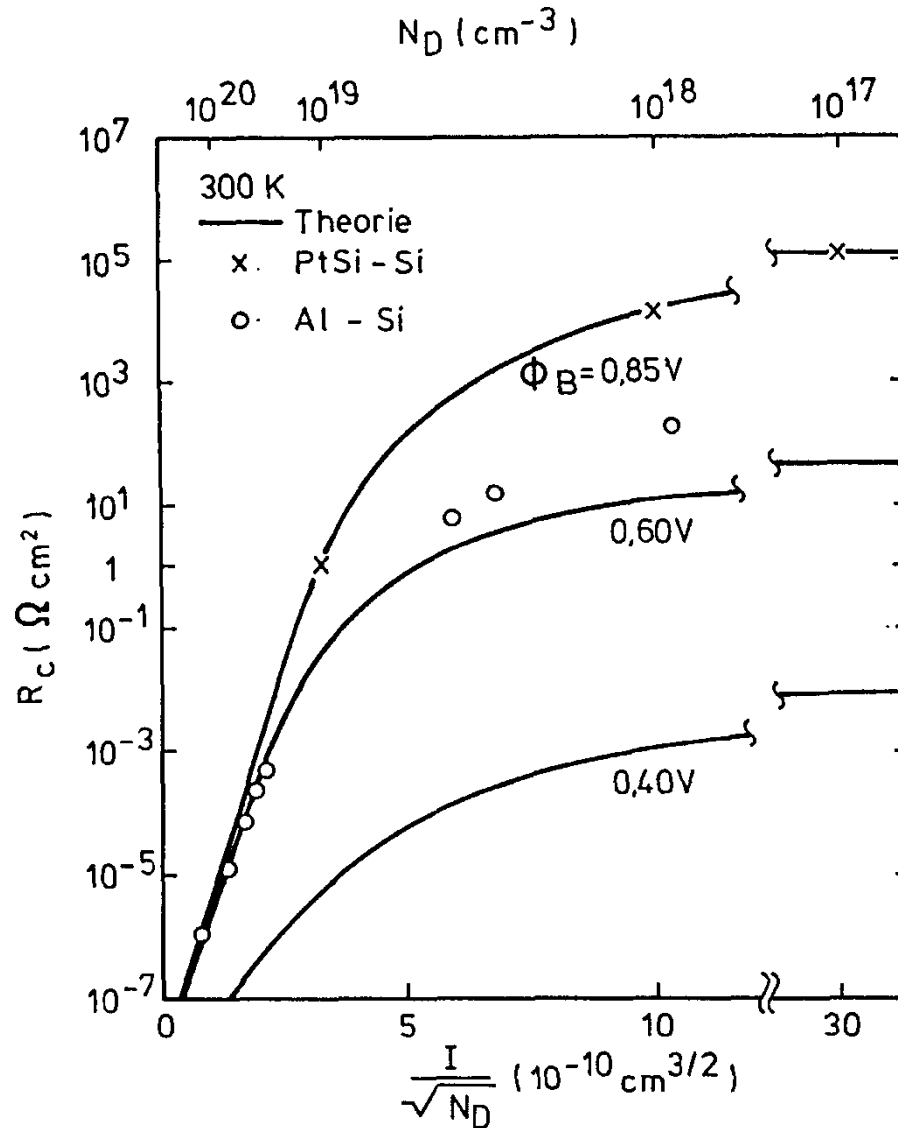
R_5 : Widerstand Gitterfinger

R_6 : Widerstand Sammelbus



Quantenmechanisches
Tunneln

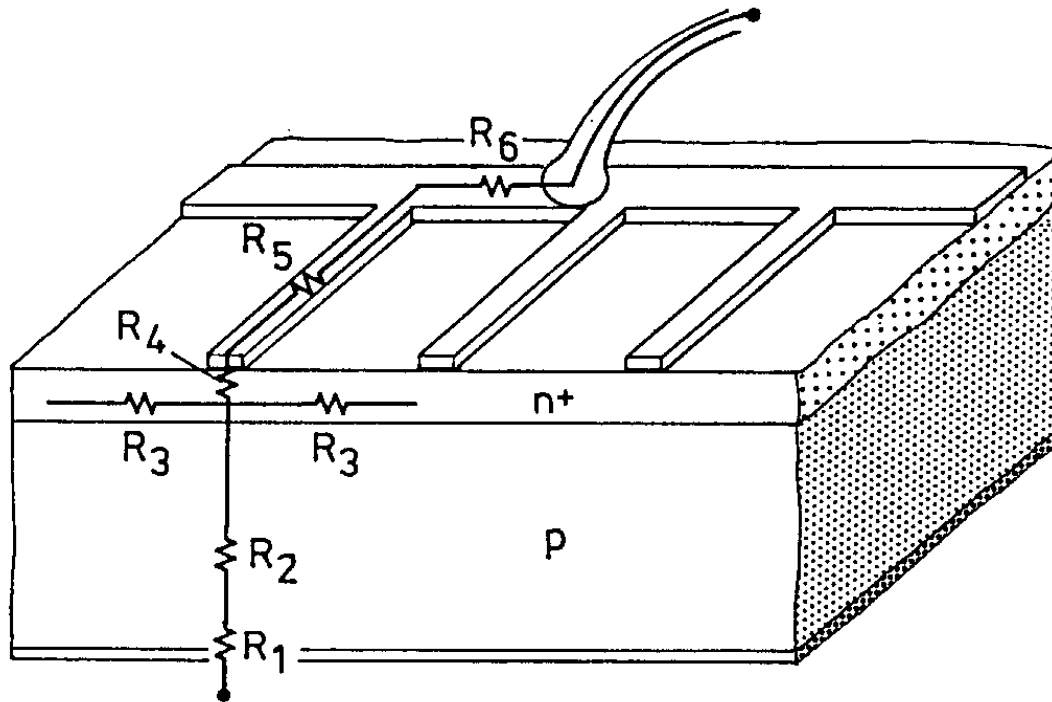
Thermionischer Effekt



-bei praktisch vorliegenden Dotierungswerten und Elektrodenmaterialien ist der Kontaktwiderstand zu vernachlässigen

Minimierung von Ohmschen Verlusten

U.Lemmer
PV 6.3.36



$$R_2 = \frac{\rho_{Si} d}{A} \quad (\text{ebenfalls vernachlässigbar})$$

~~R₁: Widerstand Metall-Halbleiter-Kontakt Rückseite~~

R₂: Widerstand der Basis

R₃: Lateralwiderstand Emitter

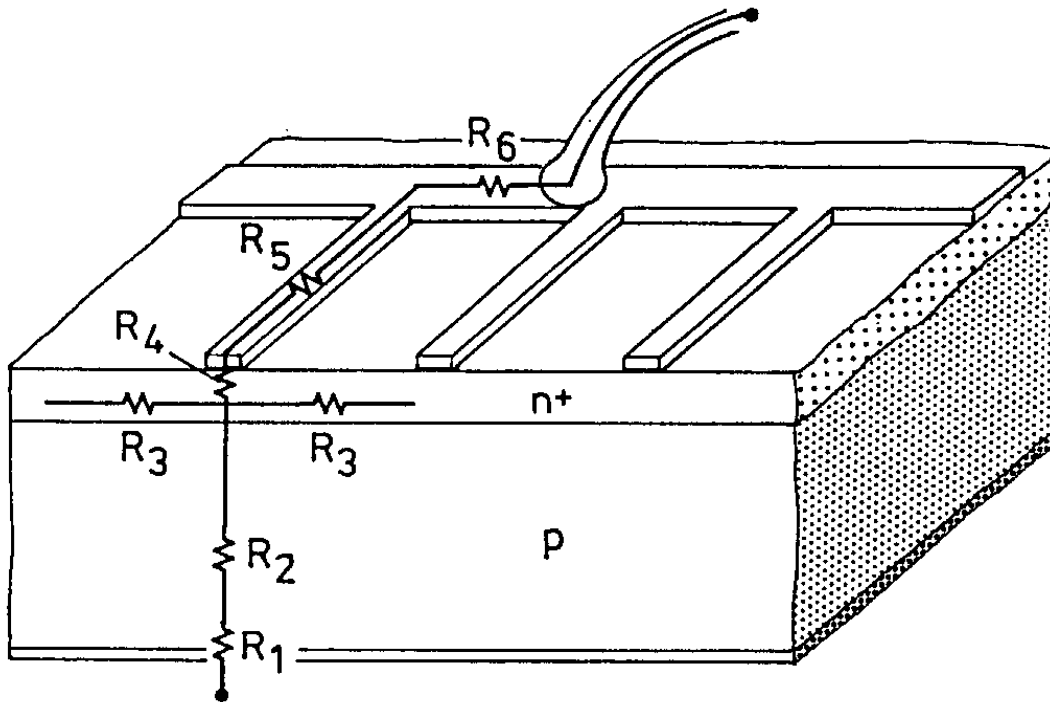
~~R₄: Widerstand Metall-Halbleiter Kontakt am Gitterfinger~~

R₅: Widerstand Gitterfinger

R₆: Widerstand Sammelbus

Minimierung von Ohmschen Verlusten

U.Lemmer
PV 6.3.37



R_1 : Widerstand Metall-Halbleiter-Kontakt Rückseite

R_2 : Widerstand der Basis

R_3 : Lateralwiderstand Emitter

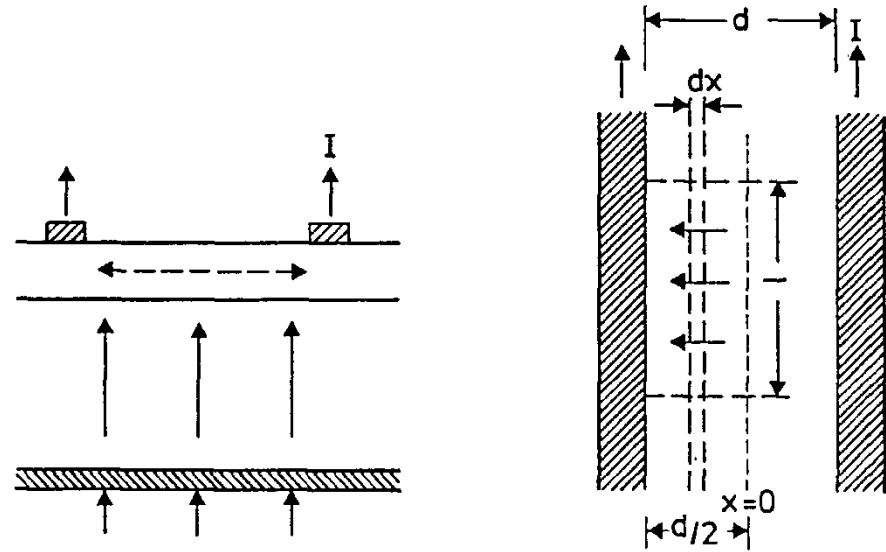
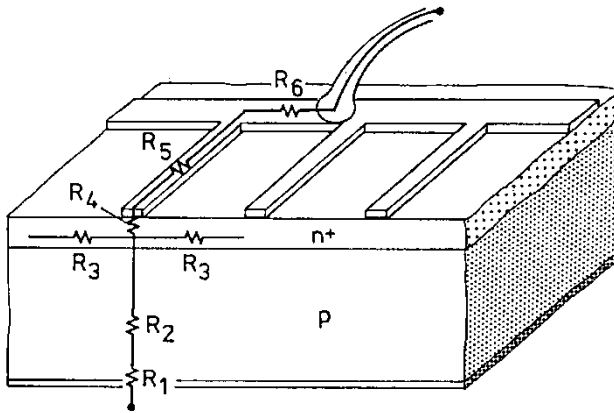
R_4 : Widerstand Metall-Halbleiter Kontakt am Gitterfinger

R_5 : Widerstand Gitterfinger

R_6 : Widerstand Sammelbus

Lateralwiderstand zwischen Gitterfingern

U.Lemmer
PV 6.3.38



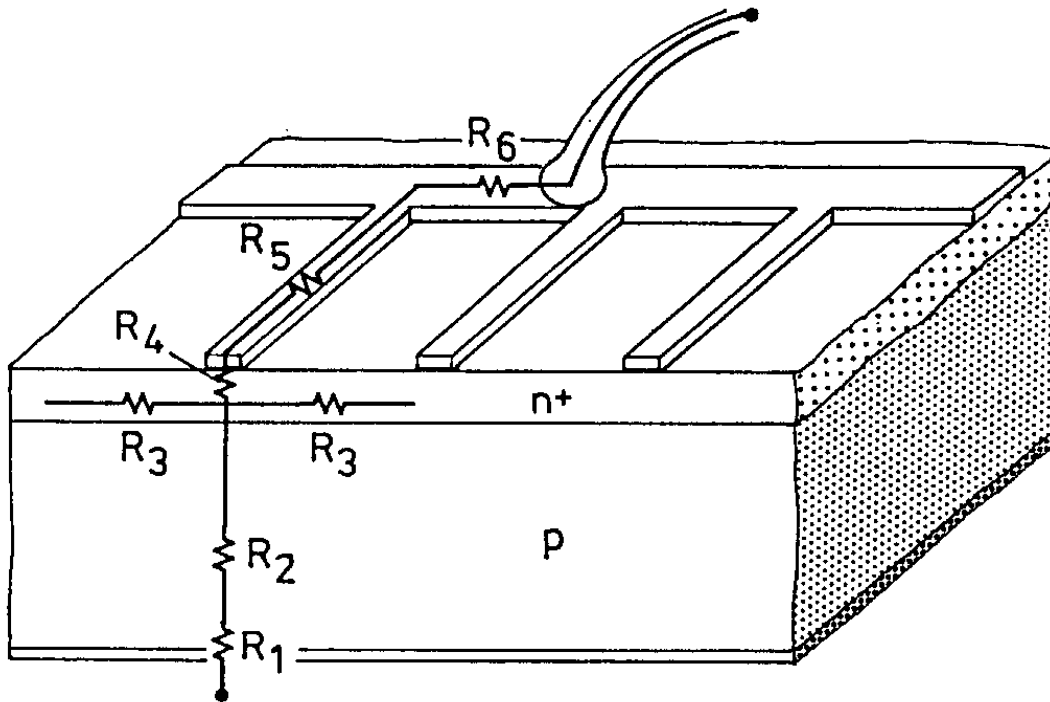
Integration ergibt
Verlustleistung:

$$P = J^2 I R_{\square} \frac{d^3}{24} = \left(J^2 I^2 \frac{d^2}{4} \right) \frac{R_{\square} d}{6l} = R_3$$

$$R_3 = \frac{R_{\square} d}{6l} \quad (\text{ist relevant})$$

Minimierung von Ohmschen Verlusten

U.Lemmer
PV 6.3.39



R_1 : Widerstand Metall-Halbleiter-Kontakt Rückseite

R_2 : Widerstand der Basis

R_3 : Lateralwiderstand Emitter

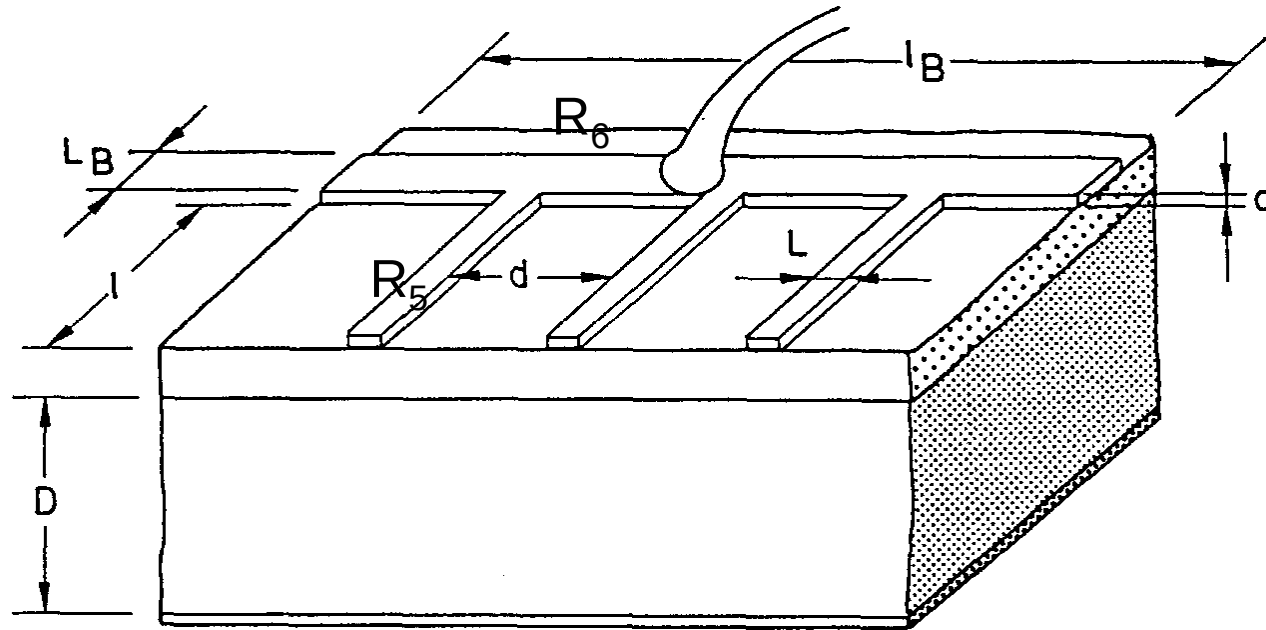
R_4 : Widerstand Metall-Halbleiter Kontakt am Gitterfinger

R_5 : Widerstand Gitterfinger

R_6 : Widerstand Sammelbus

Widerstand Kontaktfinger/Sammelbus

U.Lemmer
PV 6.3.40



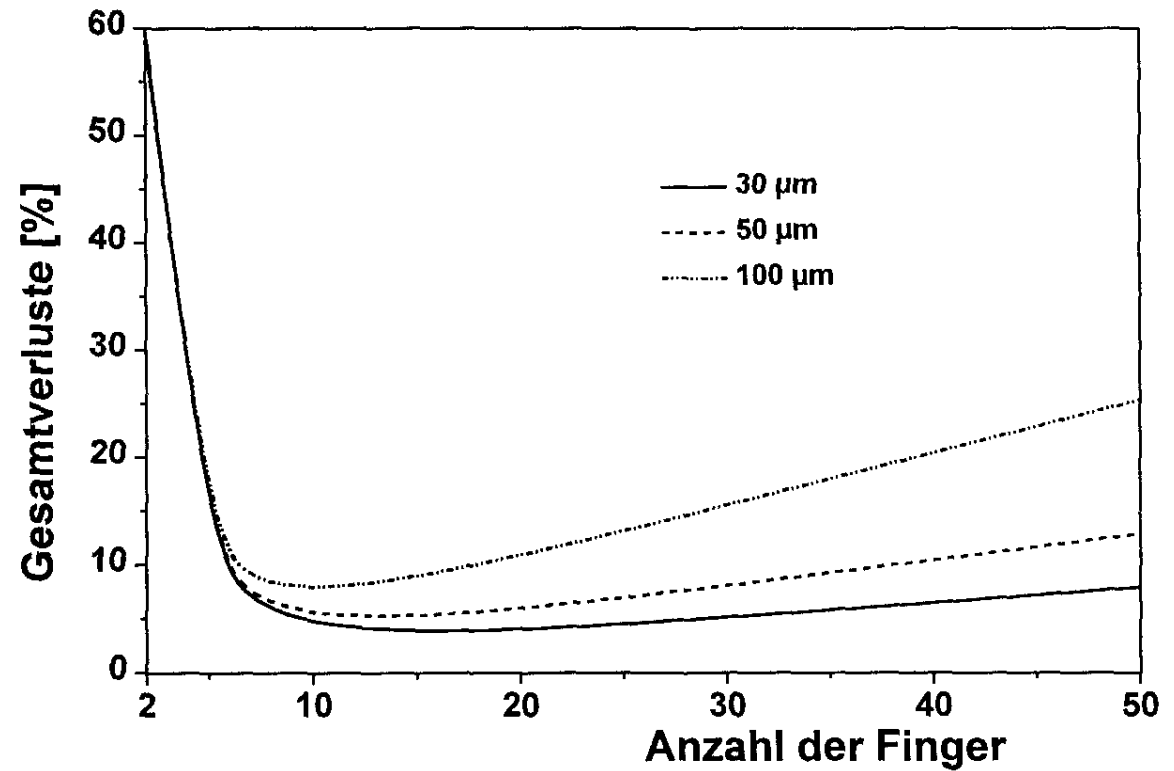
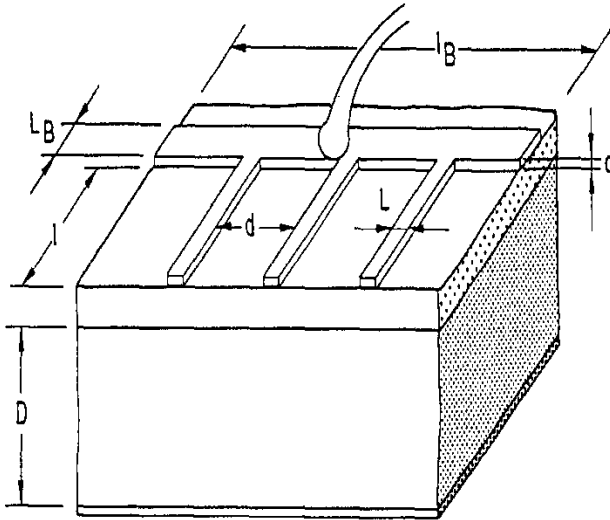
$$R_5 = \rho_{\text{met}} \frac{l}{3aL} \quad (\text{beide relevant})$$

$$R_6 = \rho_{\text{met}} \frac{l_B}{6aL_B}$$

Minimierung der Ohmschen Verluste: a groß, d klein
→ viele Finger,
→ große Flächen

Aber: Abschattungsverluste/Minimierung von optischen Verlusten

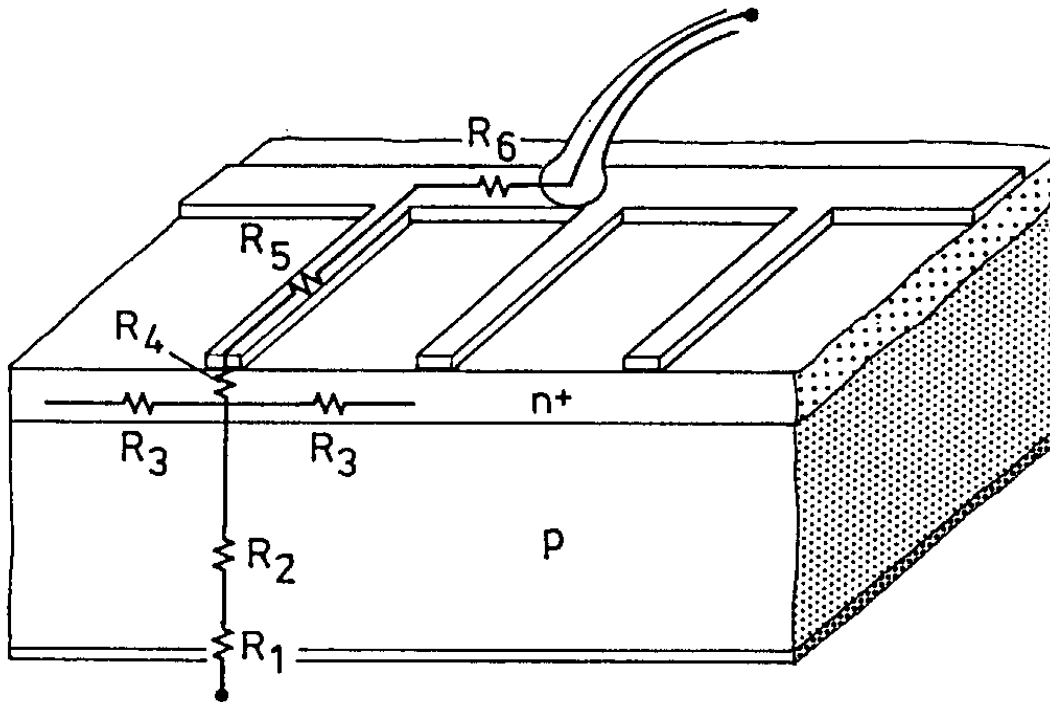
U.Lemmer
PV 6.3.41



- Kompromiss zwischen Abschattung und ohmschen Verlusten
- Verwendung von spitz zulaufenden Fingern

Minimierung von Ohmschen Verlusten

U.Lemmer
PV 6.3.42



R_1 : Widerstand Metall-Halbleiter-Kontakt Rückseite

R_2 : Widerstand der Basis

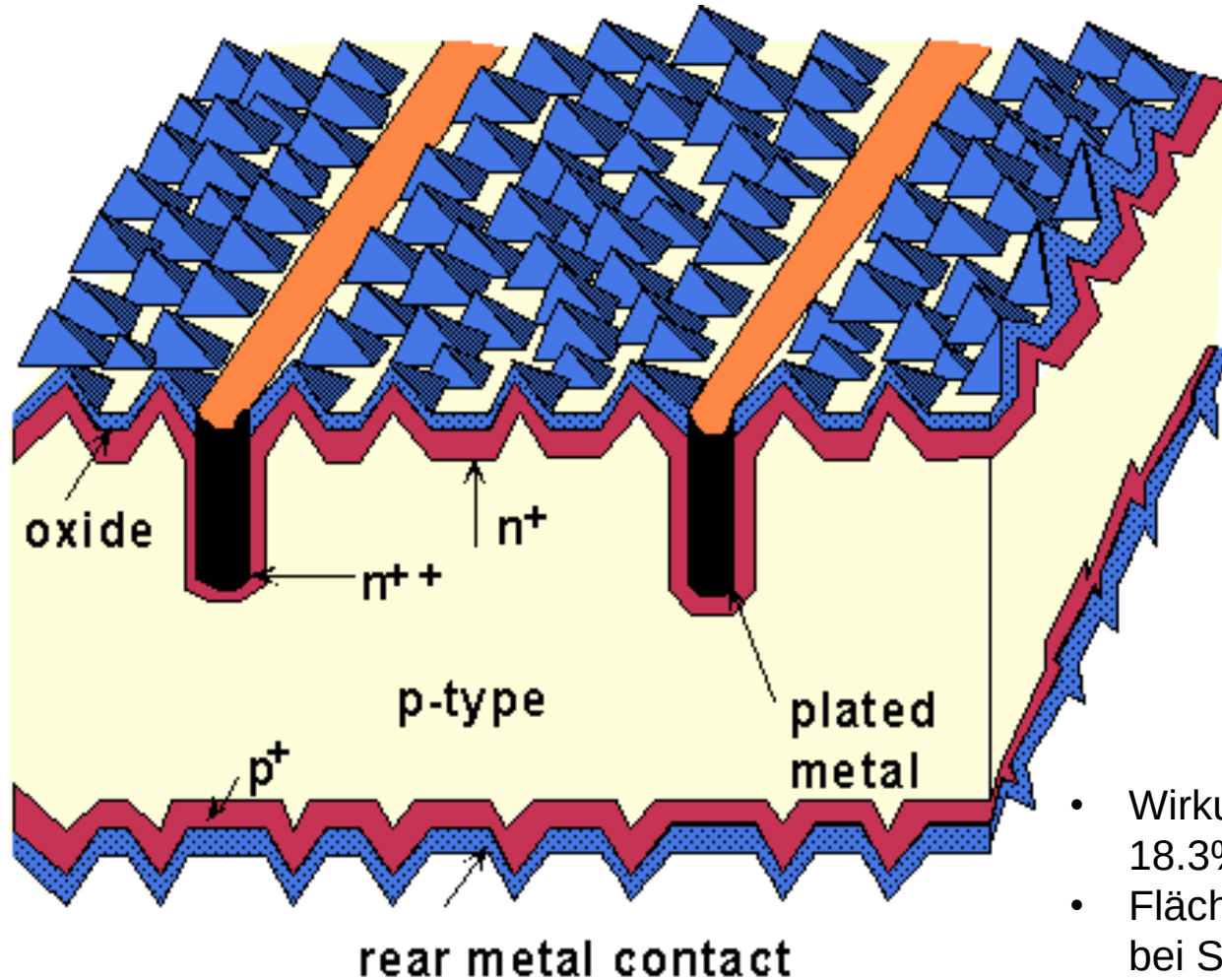
R_3 : Lateralwiderstand Emitter

R_4 : Widerstand Metall-Halbleiter Kontakt am Gitterfinger

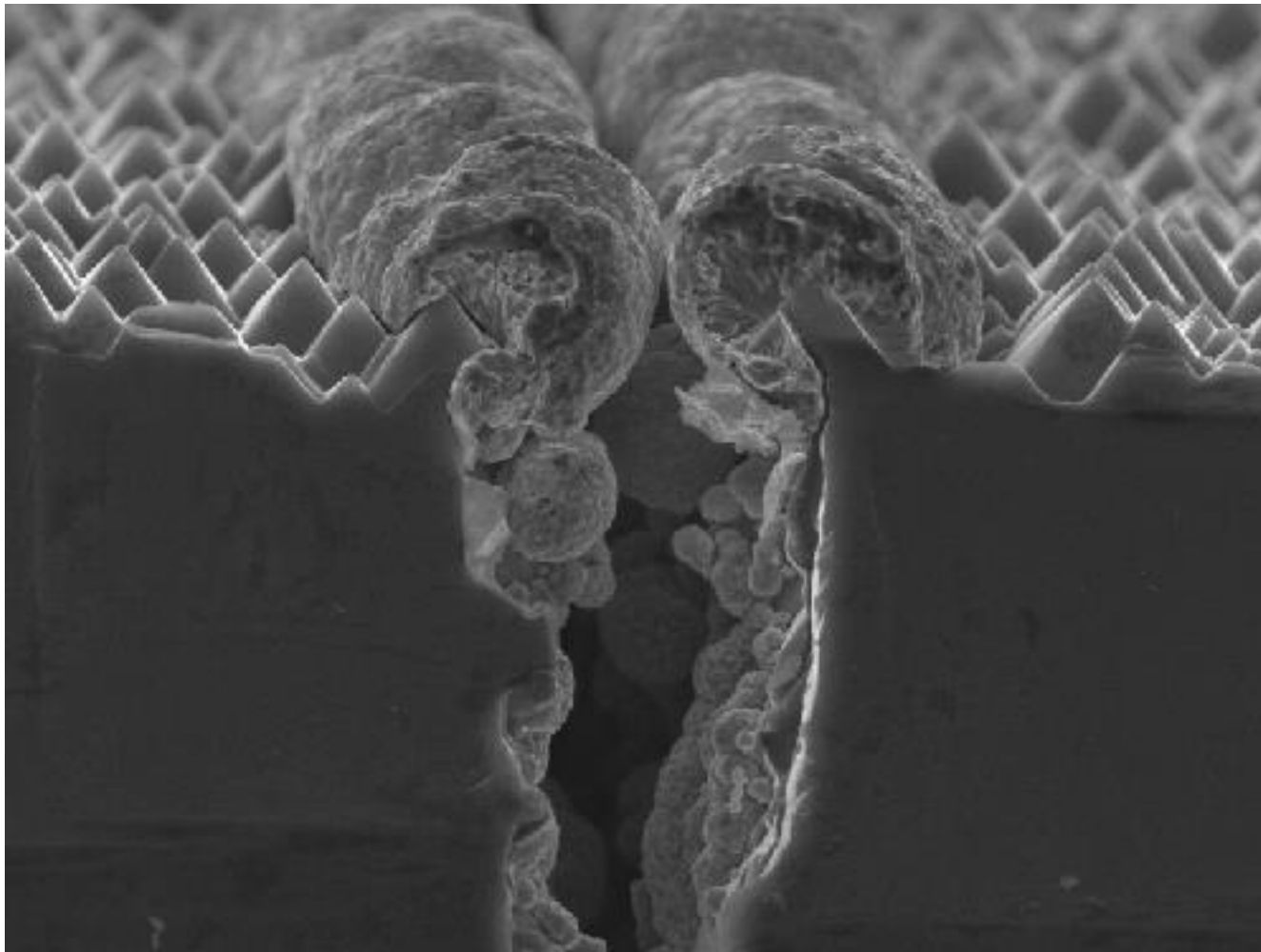
R_5 : Widerstand Gitterfinger

R_6 : Widerstand Sammelbus

Laser Grooved, Buried Contact Solar Cell (Saturn Zelle von BP)



- Wirkungsgrad 16% einzelne bis 18.3%
- Flächenverlust 2-3% (10-15% bei Standardzelle)



Cross section of a partially plated laser groove.

6.3 Hochleistungskonzepte für Si-Solarzellen

6.3.1 Rolle des Wirkungsgrades

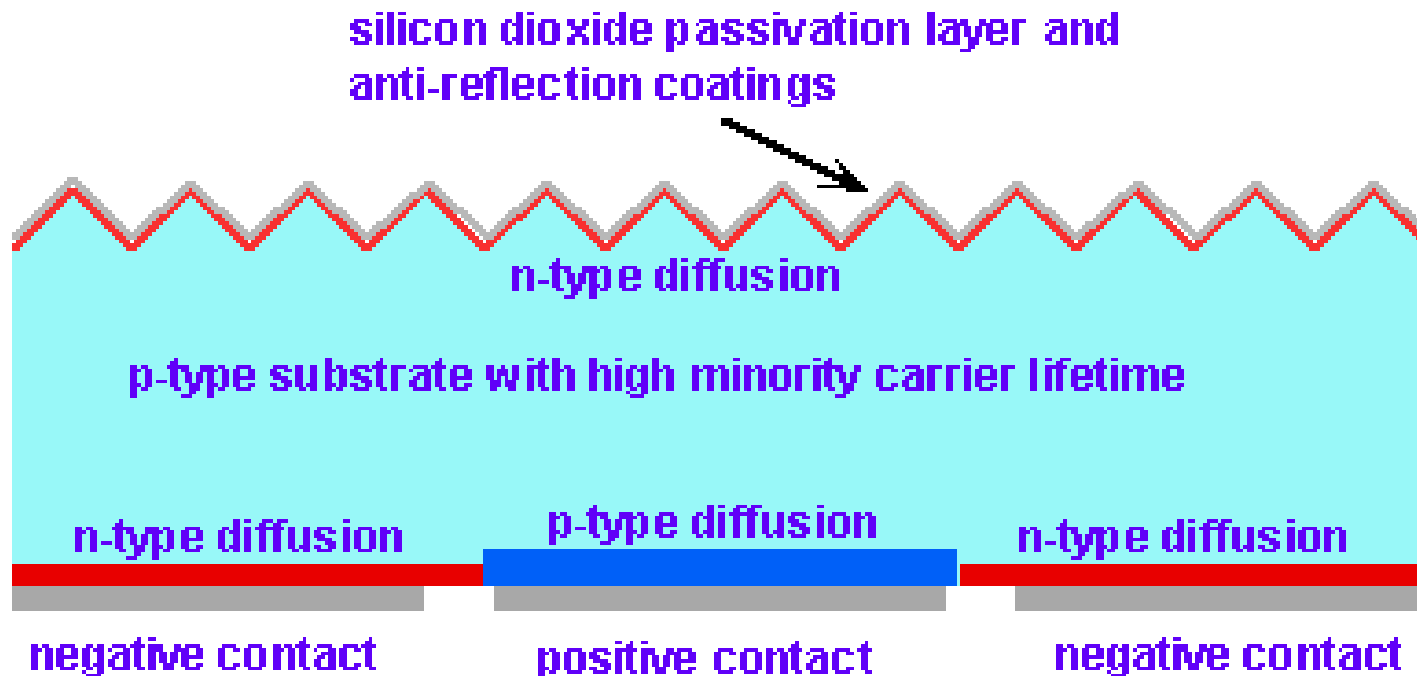
6.3.2 Minimierung rekombinatorischer Verluste

6.3.3 Optische Optimierung

6.3.4 Minimierung ohmscher Verluste

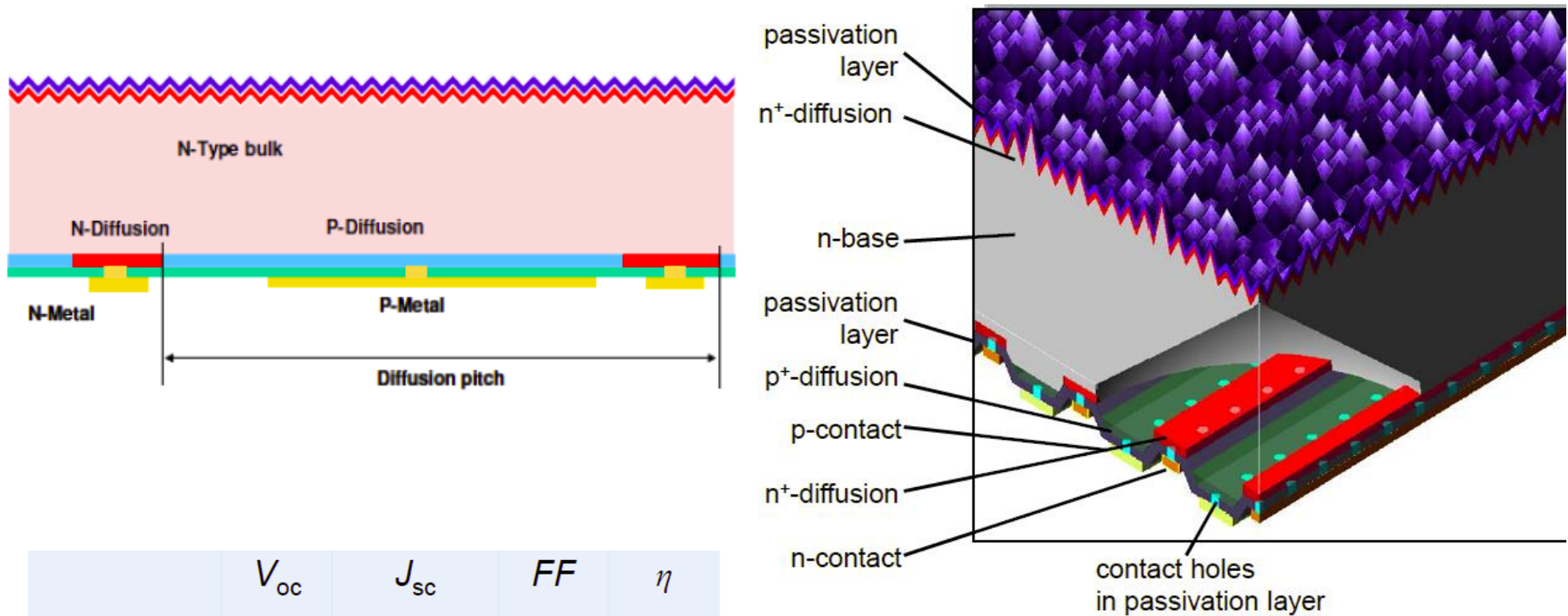
6.3.5 Rückseitenkontaktzellen

Rückkontakt Zellen



all contacts are on the rear of the cell simplifying interconnection and preventing shading losses

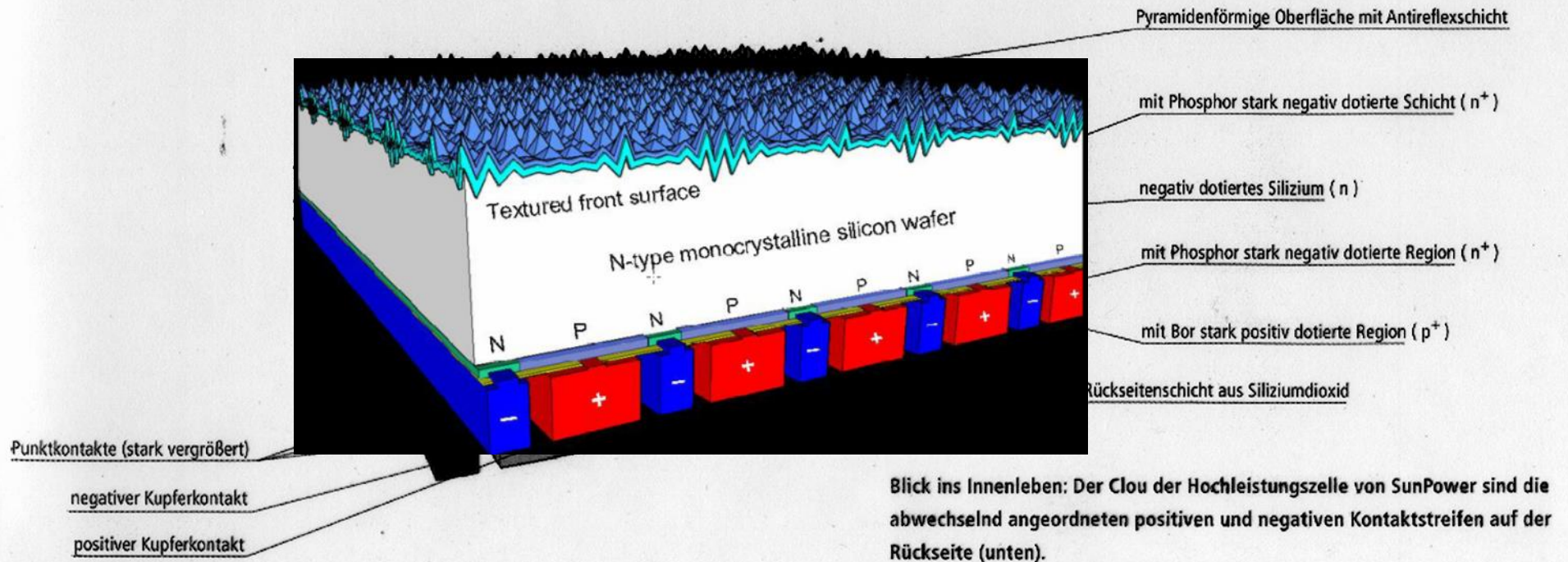
Interdigitated Back contact Cell (IBC), n-type



	V_{oc}	J_{sc}	FF	η
	[mV]	[mA/cm ²]	[%]	[%]
<i>n</i> -type CZ-Si 155 cm ²	721	40.5	82.9	24.2

Modulwirkungsgrade > 21%

Die Rückseitenkontakt-Zelle von SunPower

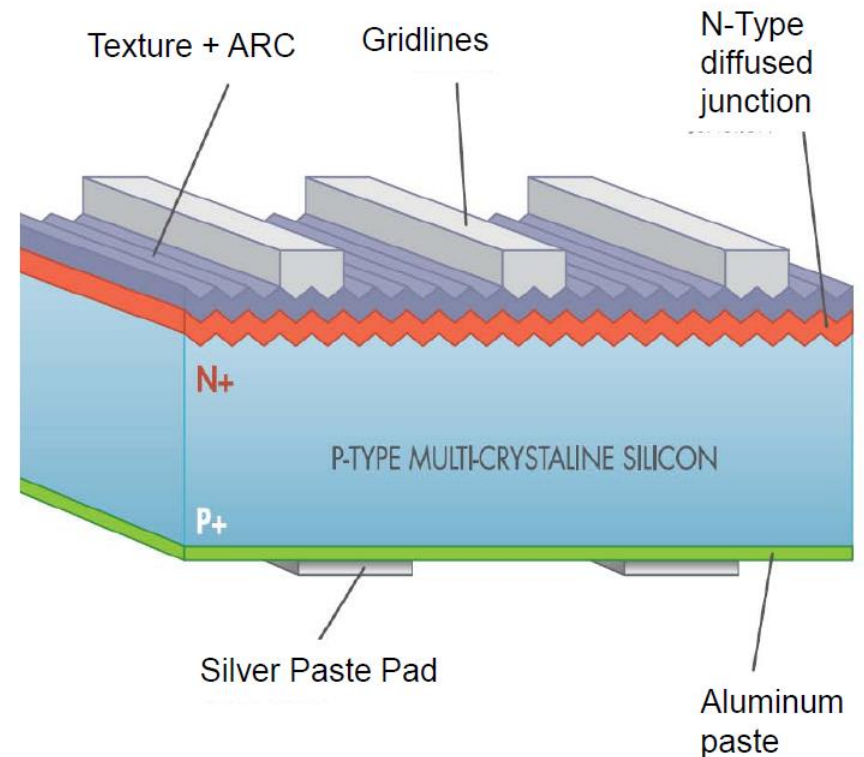
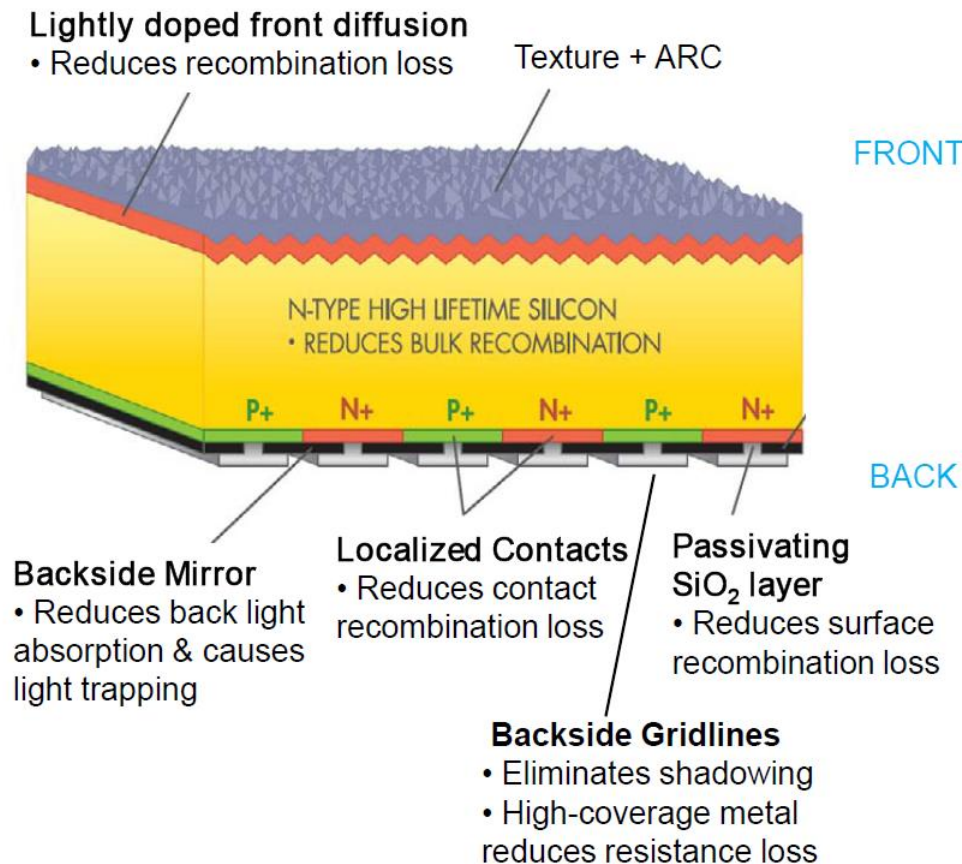


Beide Kontakte auf Rückseite: längerer Weg
 FZ-Wafer (doppelt so teuer wie Cz), Ersatz der Photolithographie durch drei
 Siebdruckschritte, Wirkungsgrad $> 21\%$

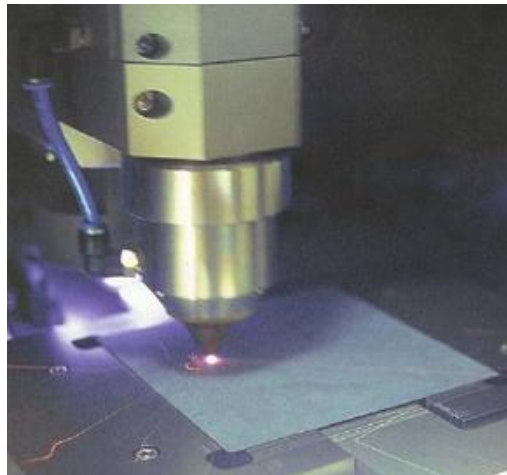
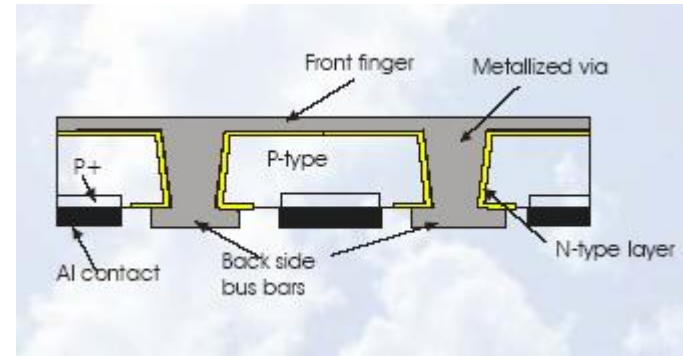
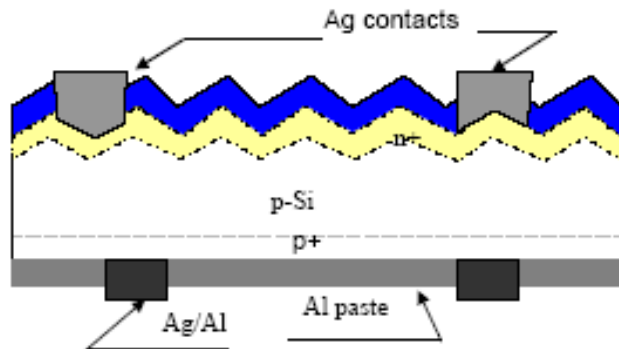
SunPower vs. Conventional c-Si Cell

SUNPOWER SOLAR CELL 22% EFFICIENCY

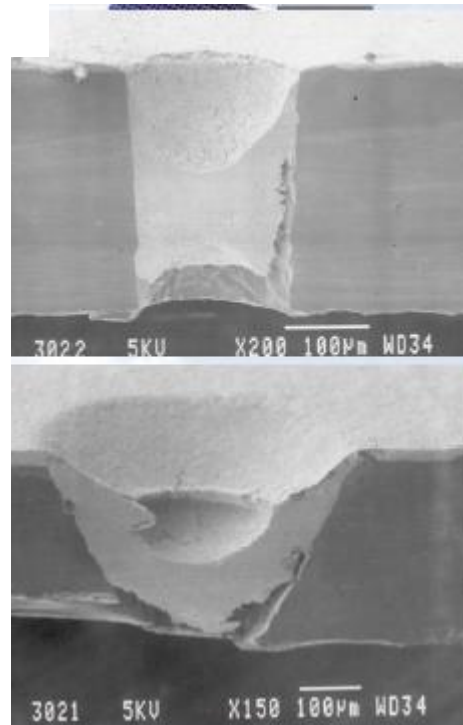
CONVENTIONAL SOLAR CELL 15% EFFICIENCY



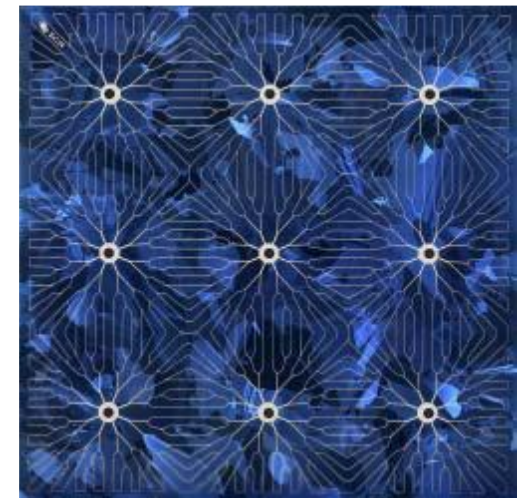
Solland Solar, Netherlands (MWT: metall wrap through)



Laser via drilling



Vias metallization

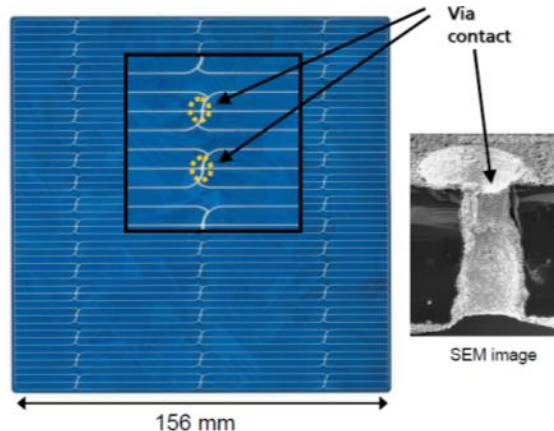
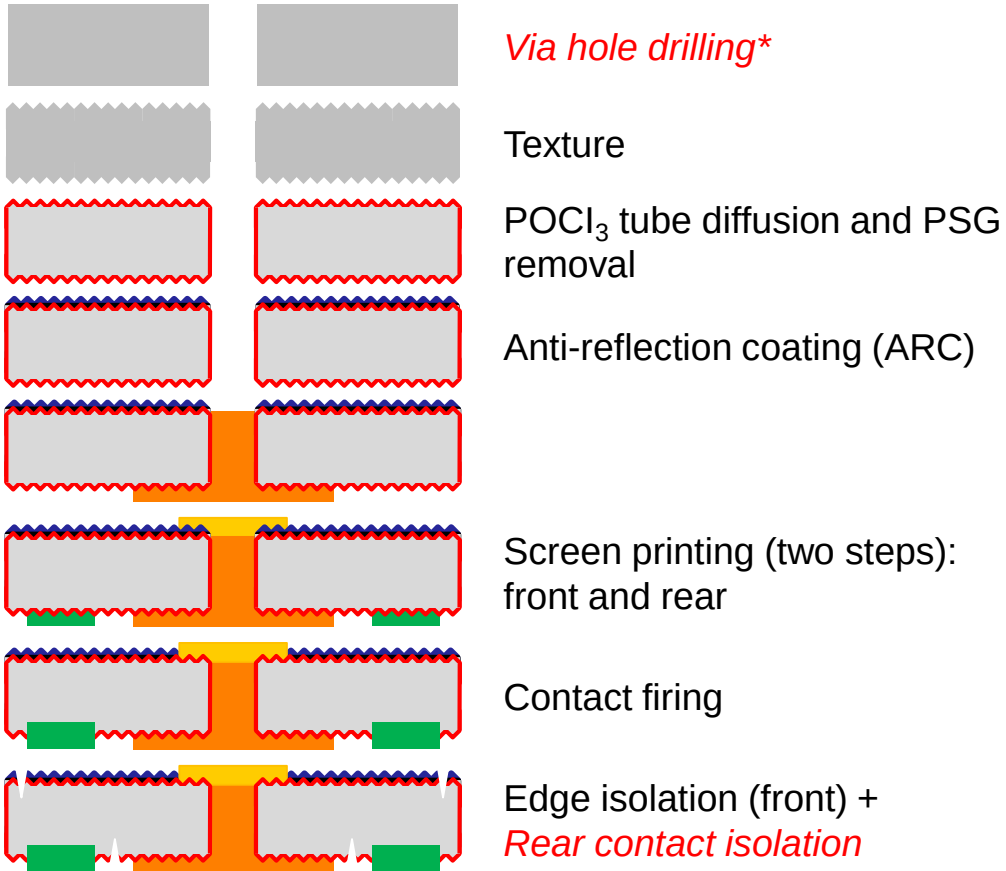


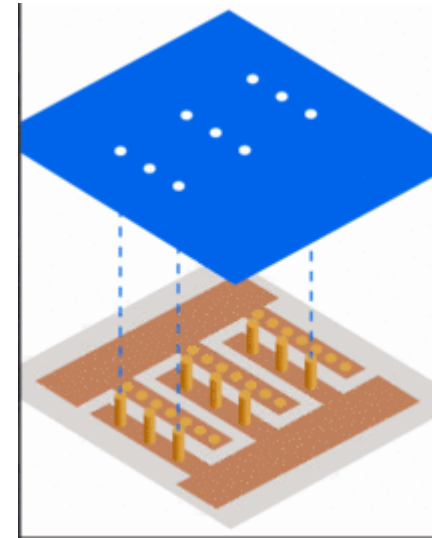
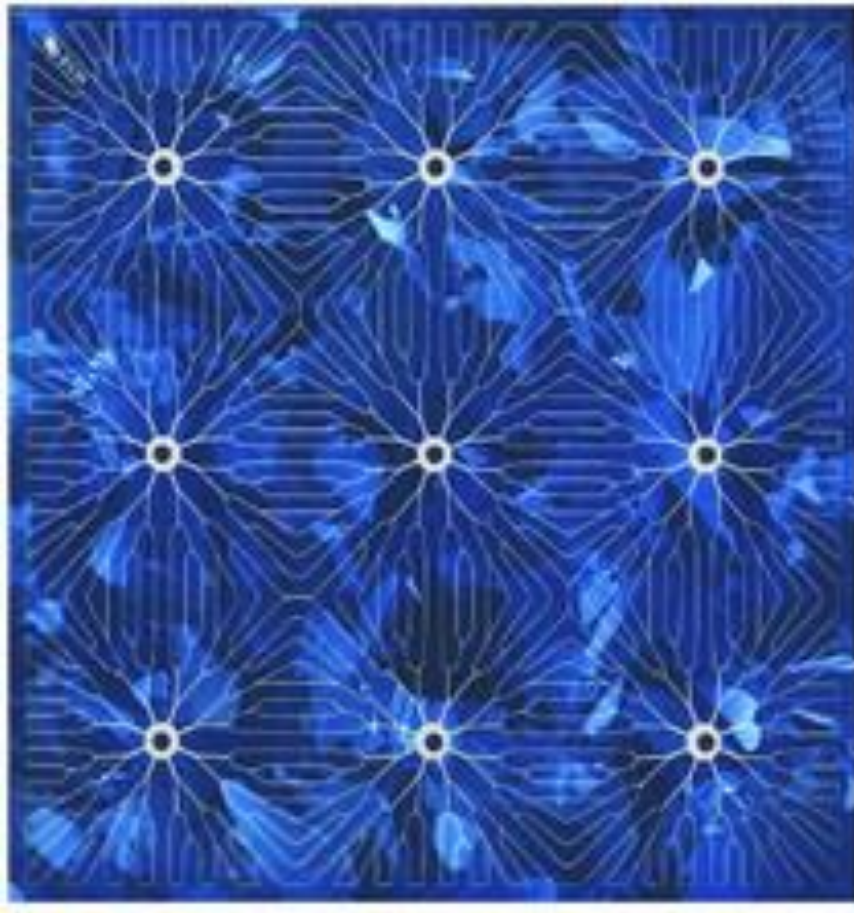
Nach J. Szlufcik 50

Metal Wrap Through (MWT) Zelle: Prozesssequenz am Fraunhofer ISE

Vorteile:

- Keine frontseitigen „busbars“
 - Ästhetik
 - Weniger Abschattung, mehr Strom
- Rückseitige Verschaltung zum Modul
- Geringere Serienverschaltungsverluste
- Nur wenige zusätzliche Prozessschritte

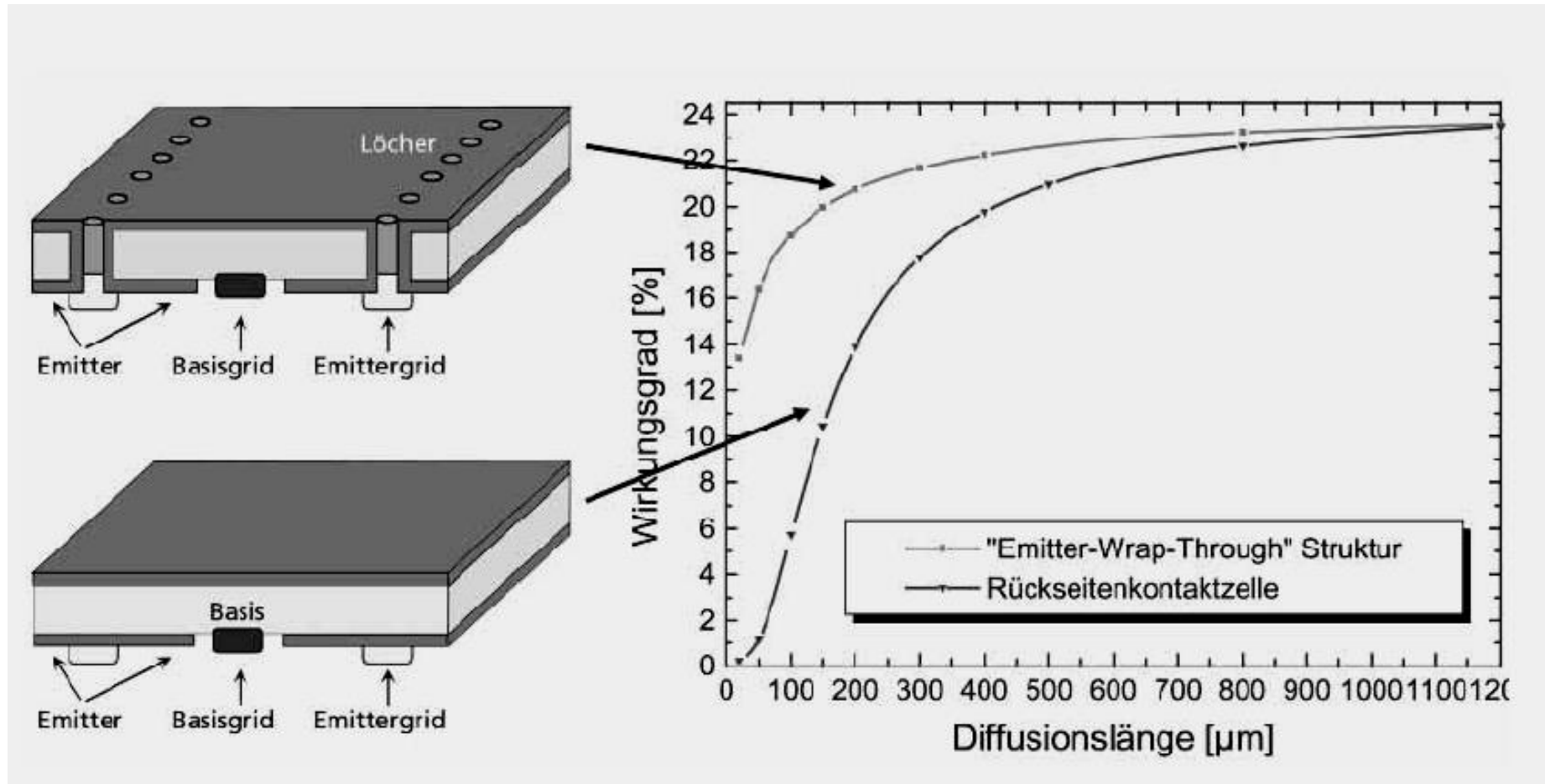




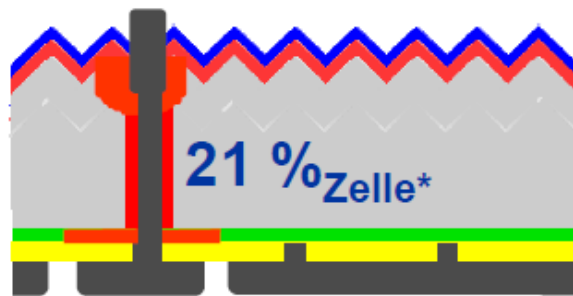
Einfache Verschaltung von speziellen MWT-Solarzellen im „pick-and-place“ Verfahren.

Quelle: ECN, BINE

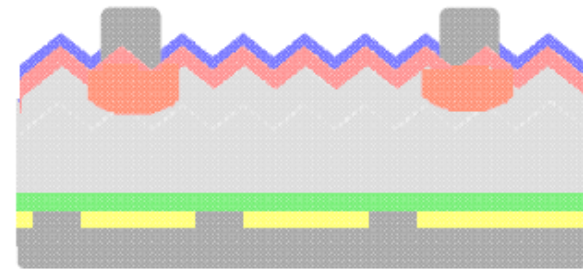
EWT Vergleich des Einflusses der Diffusionslänge auf den Wirkungsgrad einer "Emitter-Wrap Through"-Zelle = beidseitig diffundierter Emitter (oben) und einer Rückseitenkontaktzelle (unten).



Rückkontaktzellen für weniger Verluste im Modul

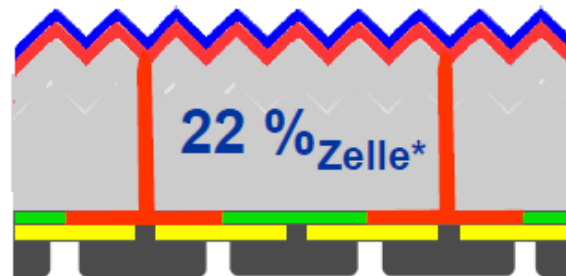


im Modul



MWT-PERC

Keine „Busbars“
Reduziert Verluste
im Modul



MWT: Metal wrap through
EWT: emitter wrap through

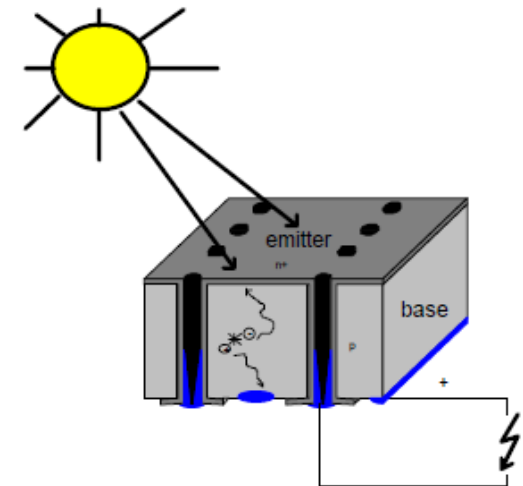


Fig. 1: Schematic drawing of the EWT cell design with laser drilled holes and metallisation on the back-side.

Zusammenfassung und Vergleich der Hocheffizienzkonzepte

Die Siliziumindustrie hat die Aktivitäten in den letzten Jahren im Bereich der Hocheffizienzzellen auf der Basis von einkristallinen Si-Wafern deutlich verstärkt. Der Laborweltrekord liegt bei 25 % (das theoretische Maximum bei 28 %). Die beste industriell hergestellte Si-Zelle liegt bei 23,4 % (Fa. Sunpower, Cypress, Q-Cells, ISE, Panasonic 25,6% (Laborwert)). Folgende Entwicklungen sind aufzuführen:

1. FZ versus CZ-Silizium

n-Typ CZ: 125 x 125 mm² pseudo square: alle Defekte haben größere Einfangsquerschnitte für Löcher $\Rightarrow$ n-Typ besser (Nachteil Emitter s. u.)
p-Typ (B-O-Komplex $\rightarrow$ licht-induzierte Degradation) FZ zwar besser, aber teurer

$\rightarrow$ klarer Trend zu n-Typ CZ (Dicke 150 – 280 μm)
(Einfangsquerschnitt für Elektronen ist größer $\Rightarrow$ wenn Löcher die Minoritäten sind
 $\rightarrow$ günstigere Bedingungen, größere Toleranz gegenüber Verunreinigungen (Fe))

2. Zellkonzept

- | | | |
|-----|----------------------|---|
| 2.1 | Metall Wrap Through | Finger oben, Löcher in Zelle, Ableiter hinten |
| 2.2 | Emitter Wrap Through | Gesamte Metalle hinten, nur Emitter vorne |
| | | (gleiche Sammlung; ca. 10.000 Löcher auf Zelle) |
| 2.3 | Rückkontaktzelle | „High end“-Lösung, alles hinten,
Diffusionslänge muss 3 – 4 mal größer sein! |
| 2.4 | HIT-Zelle | auch n-Typ-Si, Emitter a-Si |

3. Technologie

B-Diffusion über BbR3 (?) → flüssig mit N2 → Borglas, im Prinzip Gasphasendiffusion aber schwieriger und höhere T als bei P

Keine Photolithographie, Äther mit KOH/Isopropanol → „random Pyramide“ / keine invertierte Pyramide (wäre Maskierung notwendig)

→ Einsatz Laser (selektive Emitter): Fokussierung des Laserstrahls (ohne Maskierung)

SiNx-Antireflexschicht

Modultechnik: rückseitig, kleine Zellverbinder; perspektivisch → Leiterbahnen auf Glas (Problem thermische Ausdehnung)

Fazit

- CZ n-Typ macht Rennen bei Hocheffizienz; → Rückkontaktzelle
- 20 %-Zellen ist eher konservative Aussage (rückseitige Passivierung (PERC) setzt sich durch), Kombinationen der Konzepte werden auch bearbeitet
- Neben verbesserten Zellkonzepten gibt es auch Fortschritte bei den Materialien: z.B. verbesserte Pasten, verbessertes poly-Si Material
- Bei Poly Si gibt es auch Verbesserungen (i-PERC: Kombination von IBC und PERC → 20-21%)