
Silicium Solarzellen: Status Quo und Entwicklungen für die Zukunft



Dr. Martin Hermle, Dr. Stefan Glunz

Fraunhofer Institut für Solare Energie Systeme ISE

77. Jahrestagung der DPG und DPG-
Frühjahrstagung

Dresden 4.-8. März 2013

Agenda

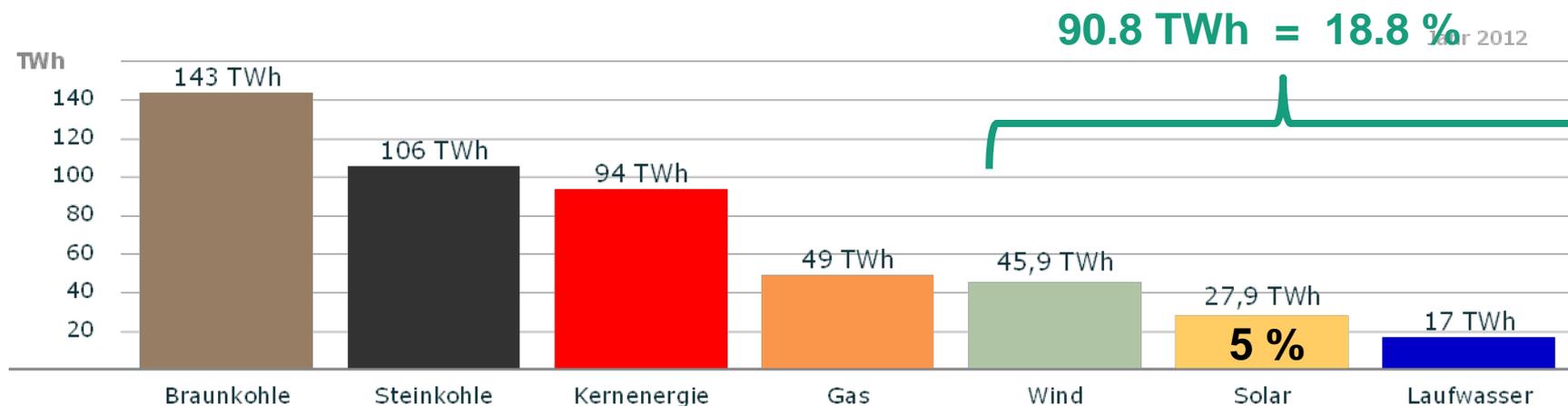
- Aktuelle Status der Photovoltaik
- Siliciumsolarzellen: State-of-the-art Technologie
- Technologien zur Steigerung des Wirkungsgrades
- Zusammenfassung

Agenda

- **Aktuelle Status der Photovoltaik**
- Siliciumsolarzellen: State-of-the-art Technologie
- Technologien zur Steigerung des Wirkungsgrades
- Zusammenfassung

Nettostromerzeugung 2012

Nettostromerzeugung



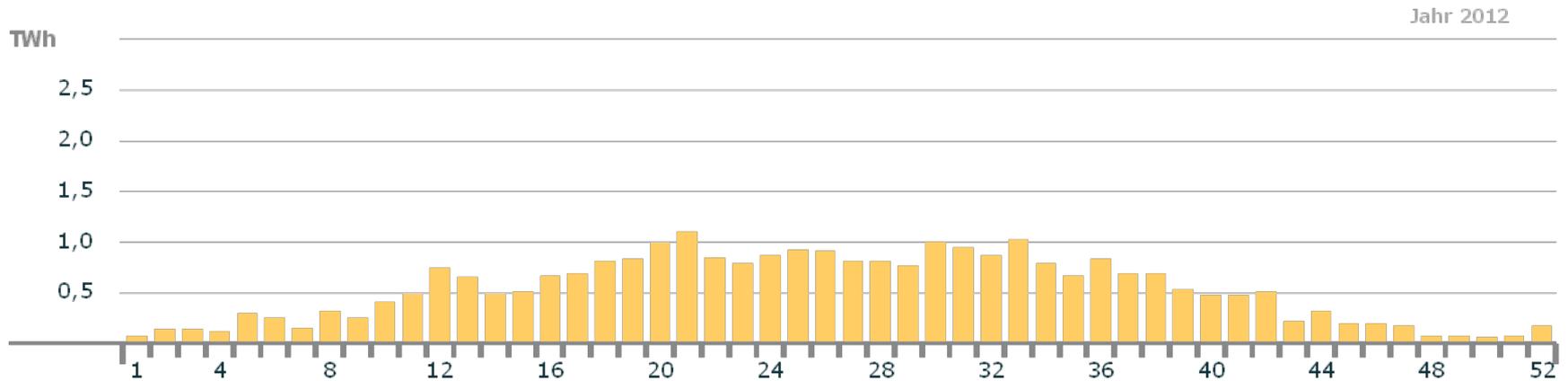
■ Datenquellen:

- Januar bis Oktober: Statistisches Bundesamt
- November und Dezember: EEX mit Korrekturfaktoren

Grafik: B. Burger, Fraunhofer ISE; Daten: Statistisches Bundesamt, Leipziger Strombörse EEX

Wöchentliche Produktion Solar

Wöchentliche Produktion Solar

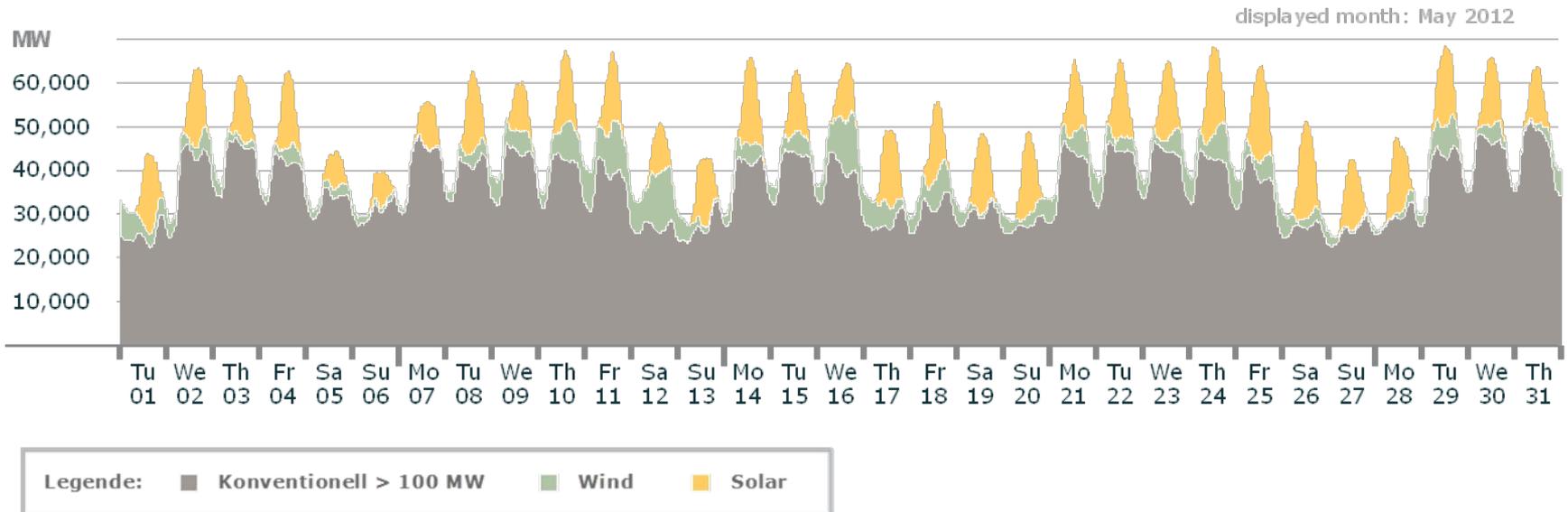


- Die maximale wöchentliche Stromproduktion erzeugten Solaranlagen bisher in Kalenderwoche 21 mit 1,1 TWh
- Die minimale wöchentliche Produktion betrug 0,06 TWh in Kalenderwoche 50

Grafik: B. Burger, Fraunhofer ISE; Daten: Leipziger Strombörse EEX

Nettostromerzeugung in Deutschland: Mai 2012

Actual production



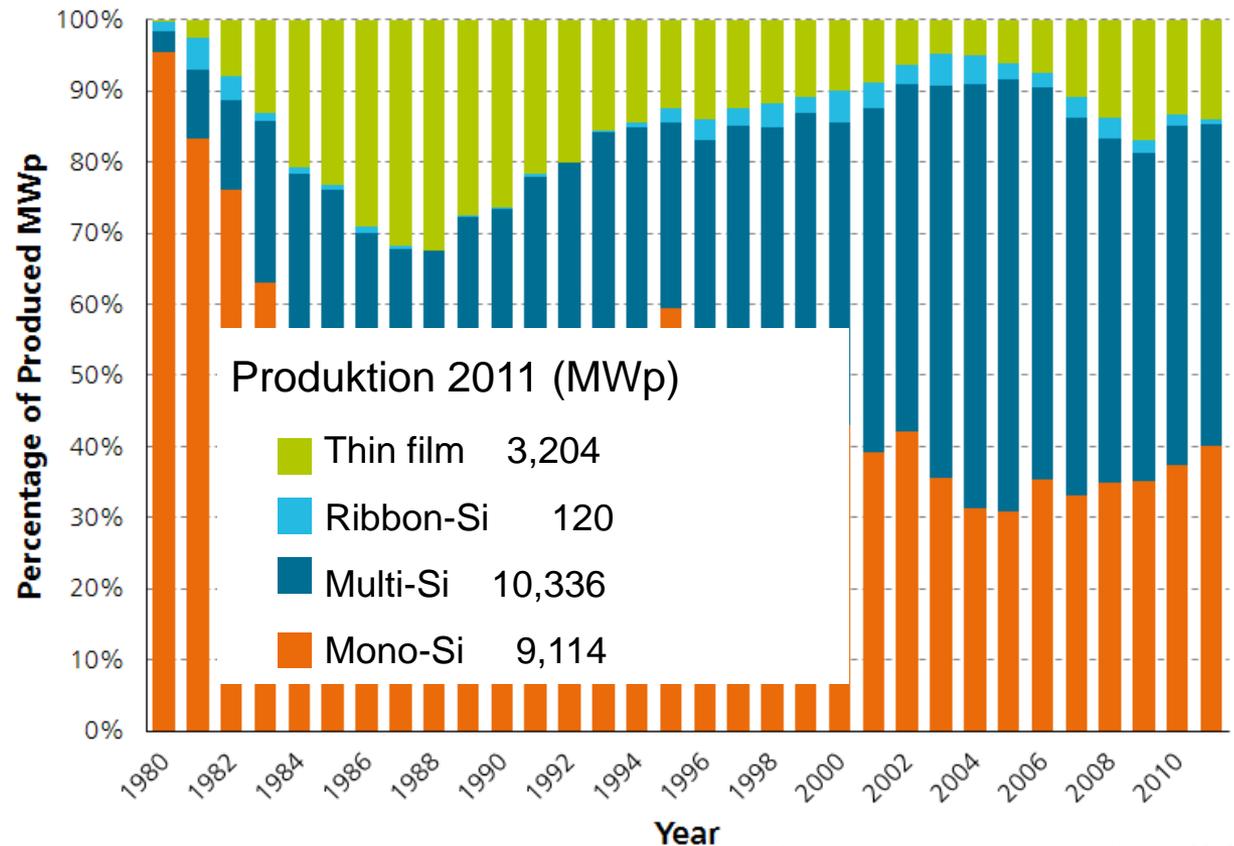
Photovoltaik produziert dann Strom, wenn die Lastspitzen am größten sind

Graph: Bruno Burger, Fraunhofer ISE; Data: EEX Transparency Platform /

PV-Markt

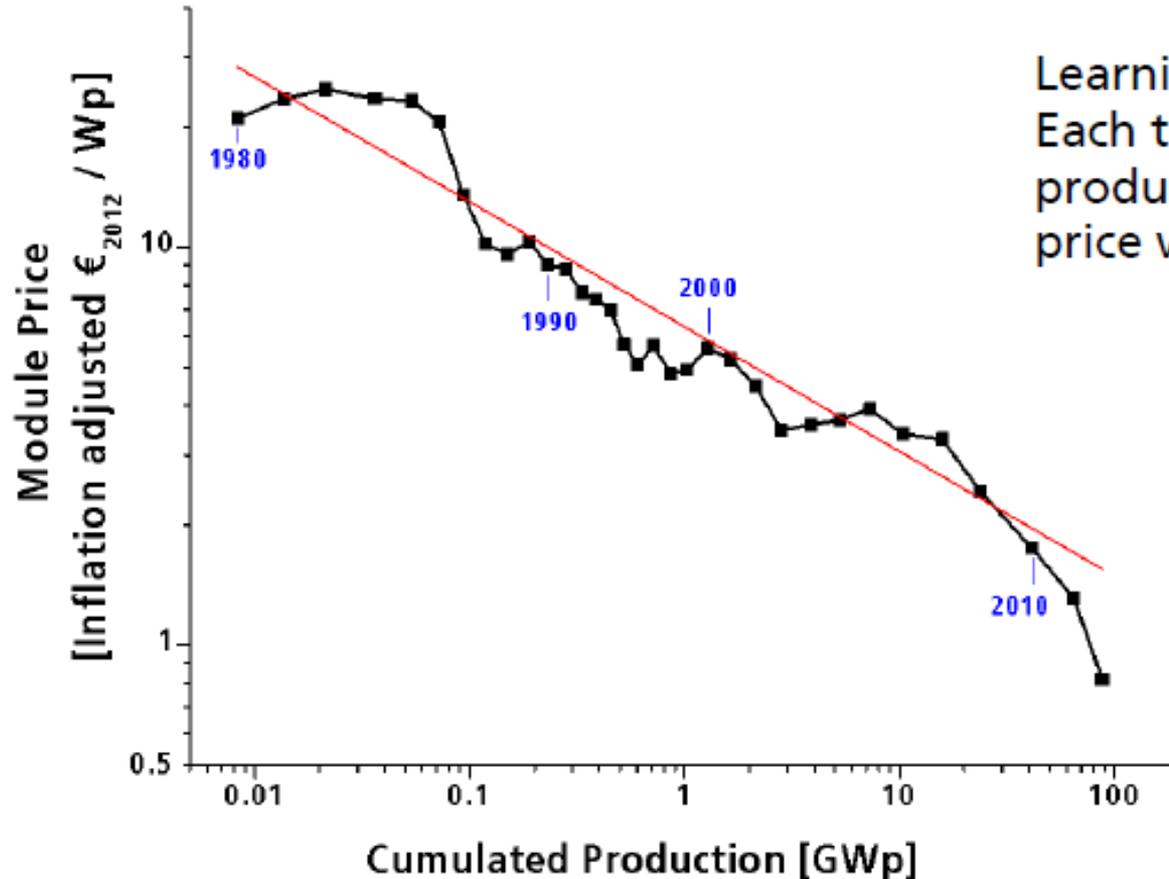
Anteil der unterschiedlichen Technologien

- PV Produktion 2011
23 MWp
- Kristallines Silicium
hat einen Markt-
anteil von 85 %
- Silicium dominiert
den PV Markt seit
über 30 Jahren



Data: Navigant Consulting Graph: PSE AG 2012

Price Learning Curve (all bulk PV-Technologies)



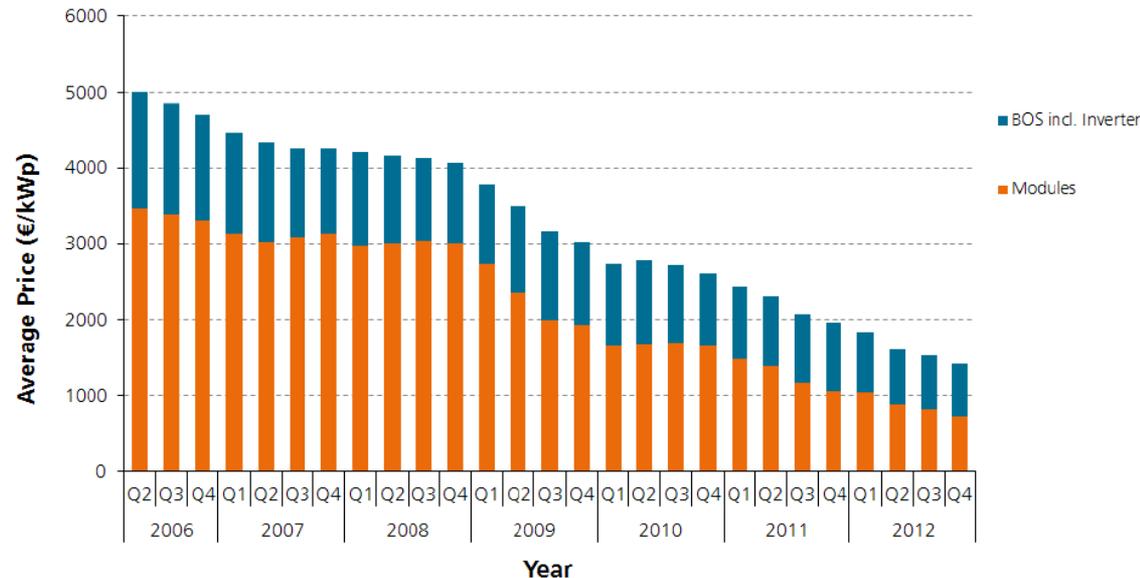
Learning Rate:
Each time the cumulative
production doubled, the
price went down by 19.6 %

Data: Navigant Consulting; EUPD module price (since 2006) Graph: PSE AG 2012

PV-Markt

Preisentwicklung 2006 bis 2012

- Anlagenpreise in den letzte 7 Jahren um 70 % gefallen
- Aktuelle Anlagenpreise Schlüsselfertig ca. 1400 €/kWp
- Stromgestehungskosten in Süddeutschland ~ 0,13-0,17 €/kWh
- Stromgestehungskosten in sonnenreicheren Gegenden <0,1 €/kWh

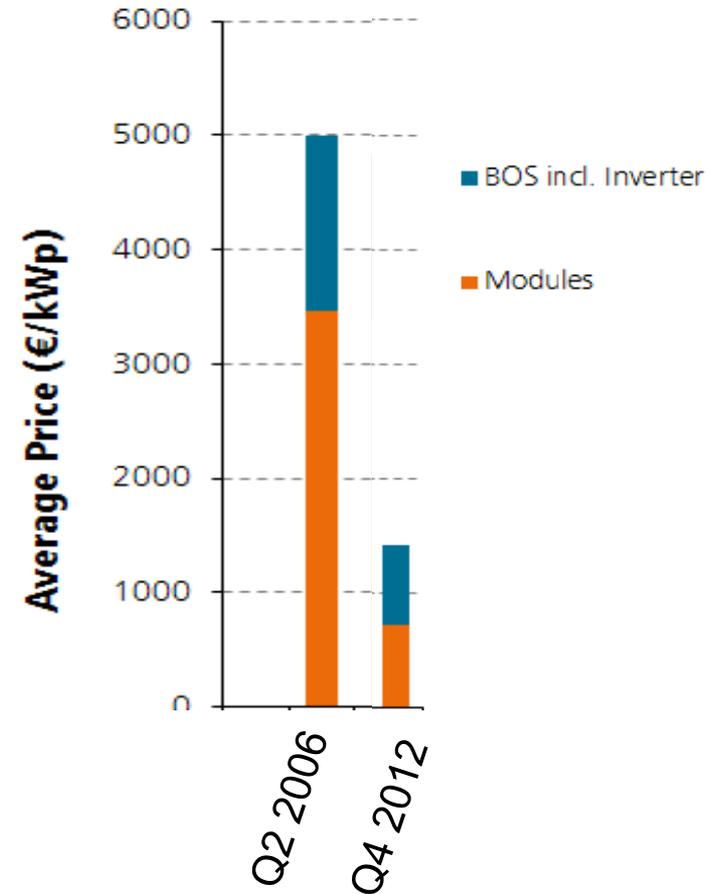


PV-Markt

Aufteilung der Kosten - Systemebene

- Anteil der Systemkosten (Wechselrichter, Aufständerung, Kabel...) steigt an
- Höhere Modulwirkungsgrade reduzieren die Systemkosten, da dies umgekehrt mit der Leistung skalieren

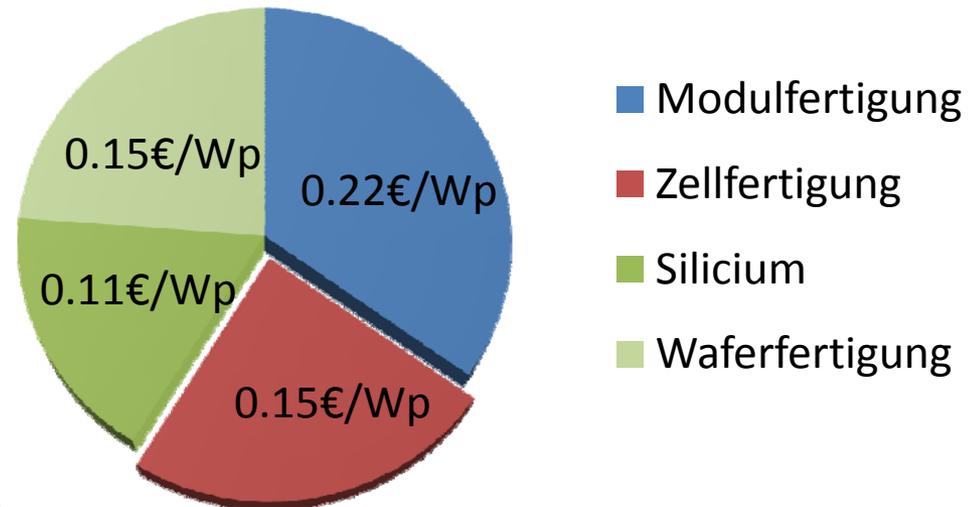
	BOS (inkl. Inverter)	Modul
2006	30 %	70 %
2012	50 %	50 %



PV-Markt

Aufteilung der Kosten - Modulebene

- Für die Zellfertigung stehen nur 25 % der Modulkosten zur Verfügung
- Wirkungsgrad der Zelle reduziert die Gesamtkosten dramatisch



Ziel für zukünftige Zelltechnologien

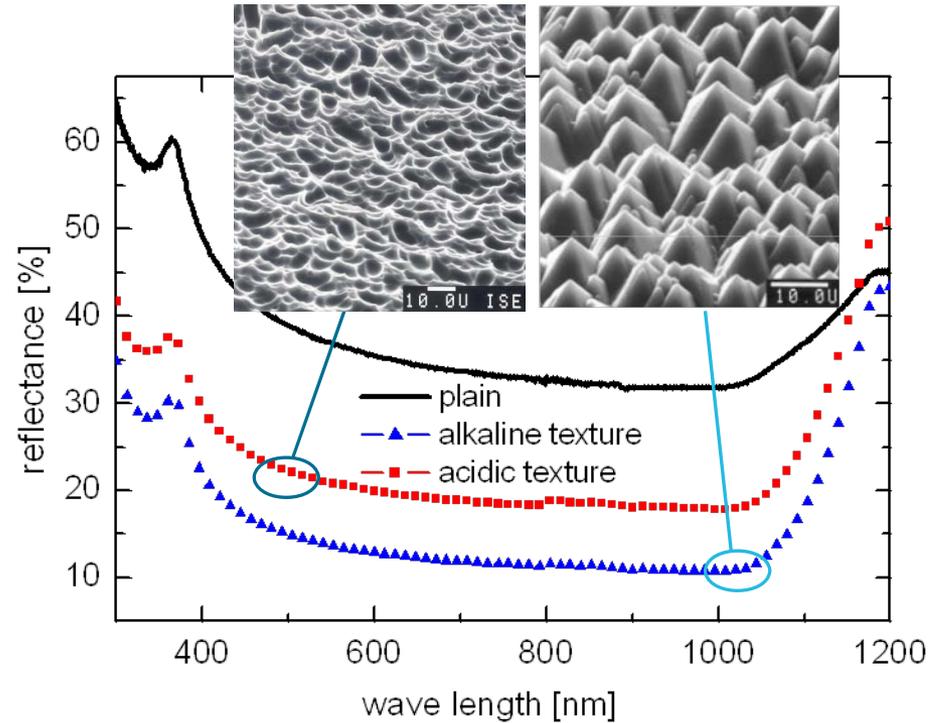
1. Höhere Wirkungsgrade
2. Reduzierung der Material- und Prozesskosten

Agenda

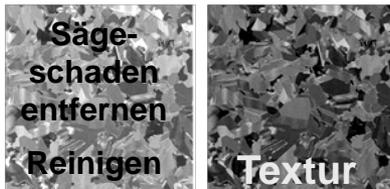
- Aktuelle Status der Photovoltaik
- **Siliciumsolarzellen: State-of-the-art Technologie**
- Technologien zur Steigerung des Wirkungsgrades
- Zusammenfassung

State-of-the-art industrial solar cell process

Saw damage removal /
texture and cleaning



Prozessfluss



State-of-the-art industrial solar cell process

Saw damage removal /
texture and cleaning

Deposition of dopant source

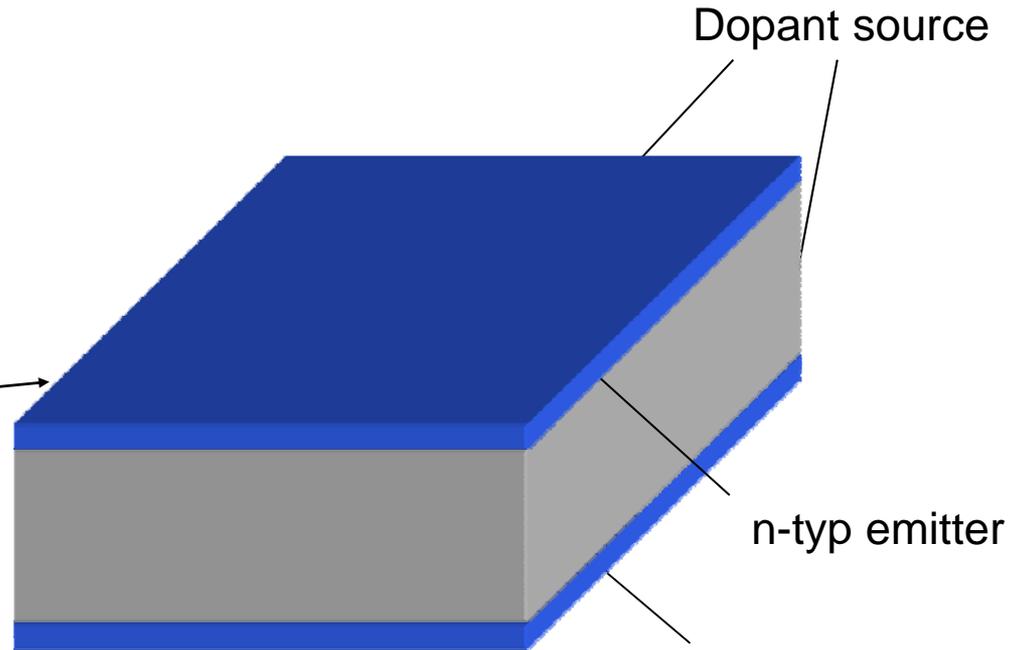
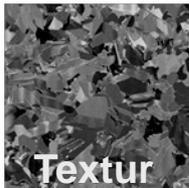
Phosphorus Silicate Glass (PSG)

Dopant source

n-type emitter

p-type Si-wafer

Prozessfluss



State-of-the-art industrial solar cell process

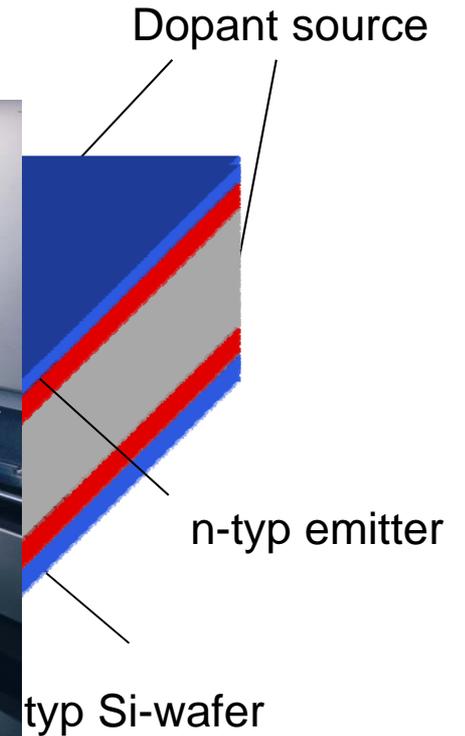
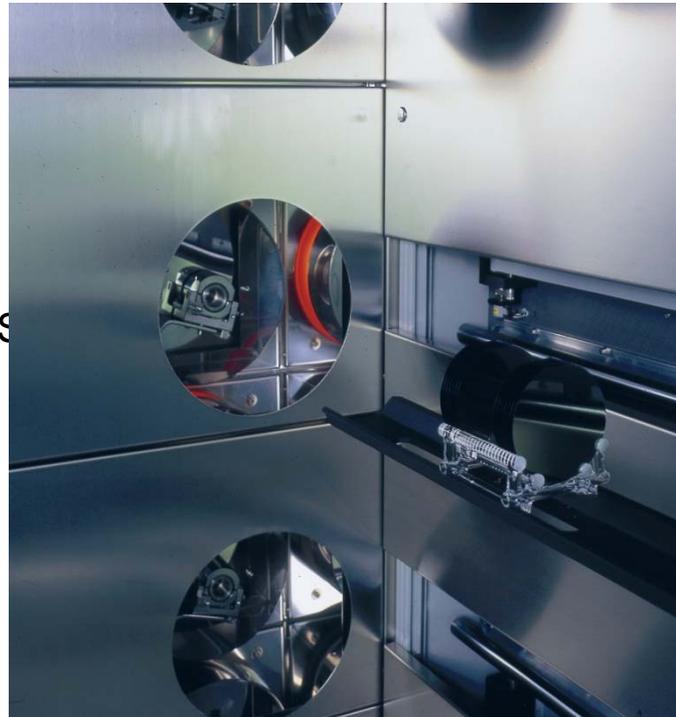
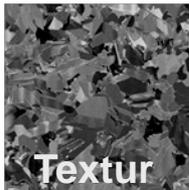
Saw damage removal /
texture and cleaning

Deposition of dopant source

Diffusion

Phosphorus Silicate Glass (PSG)

Prozessfluss



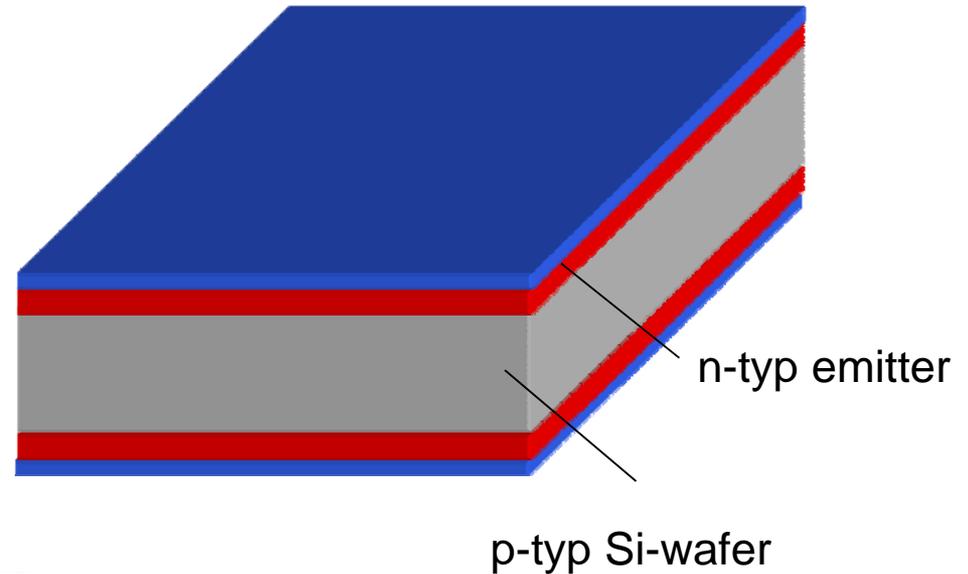
State-of-the-art industrial solar cell process

Saw damage removal /
texture and cleaning

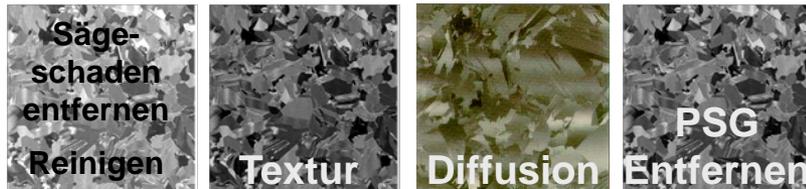
Deposition of dopant source

Diffusion

Removal of PSG and
cleaning



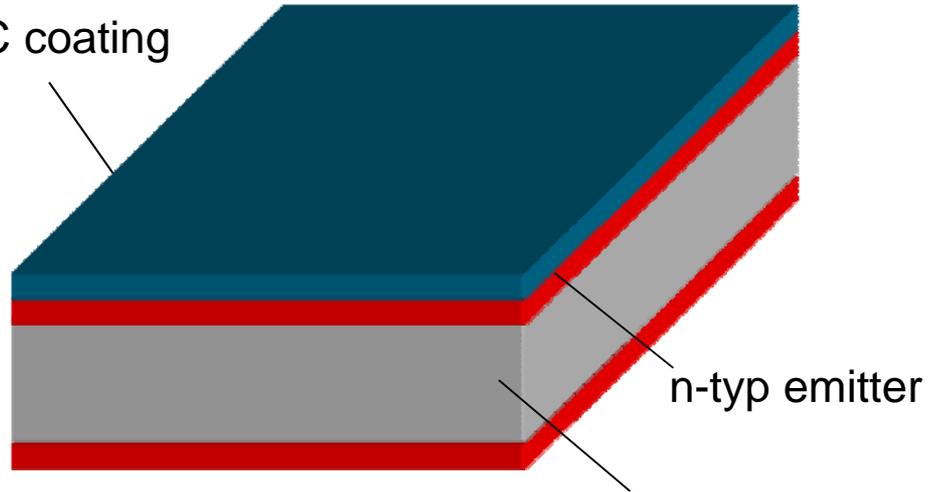
Prozessfluss



State-of-the-art industrial solar cell process

- Saw damage removal / texture and cleaning
- Deposition of dopant source
- Diffusion
- Removal of PSG and cleaning
- Deposition of SiN_x ARC-coating

SiN_x ARC coating

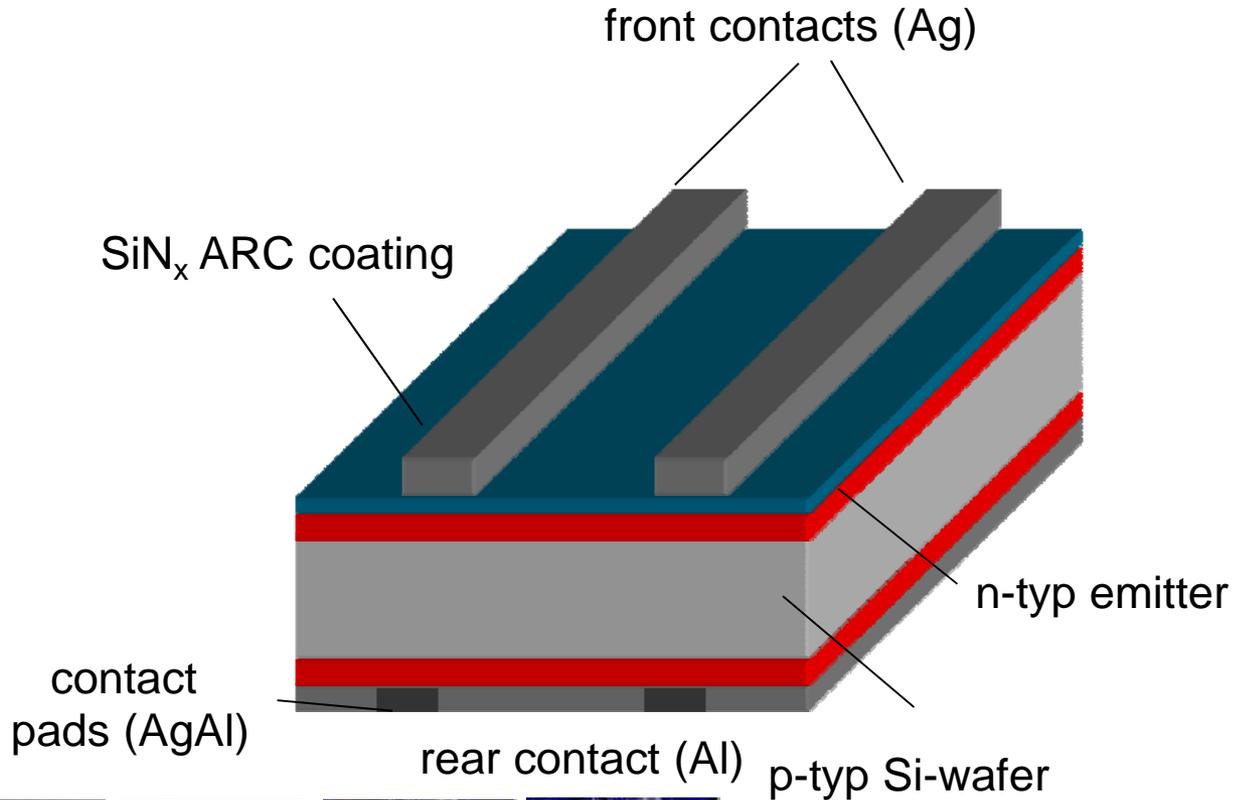


Prozessfluss

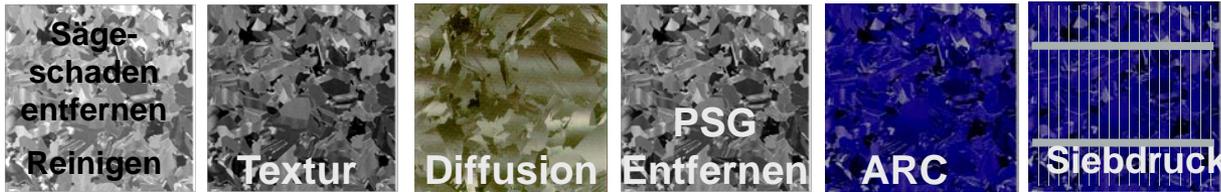


State-of-the-art industrial solar cell process

- Saw damage removal / texture and cleaning
- Deposition of dopant source
- Diffusion
- Removal of PSG and cleaning
- Deposition of SiN_x ARC-coating
- Screen printing of contacts (Al, AgAl, Ag)

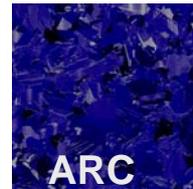
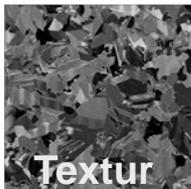
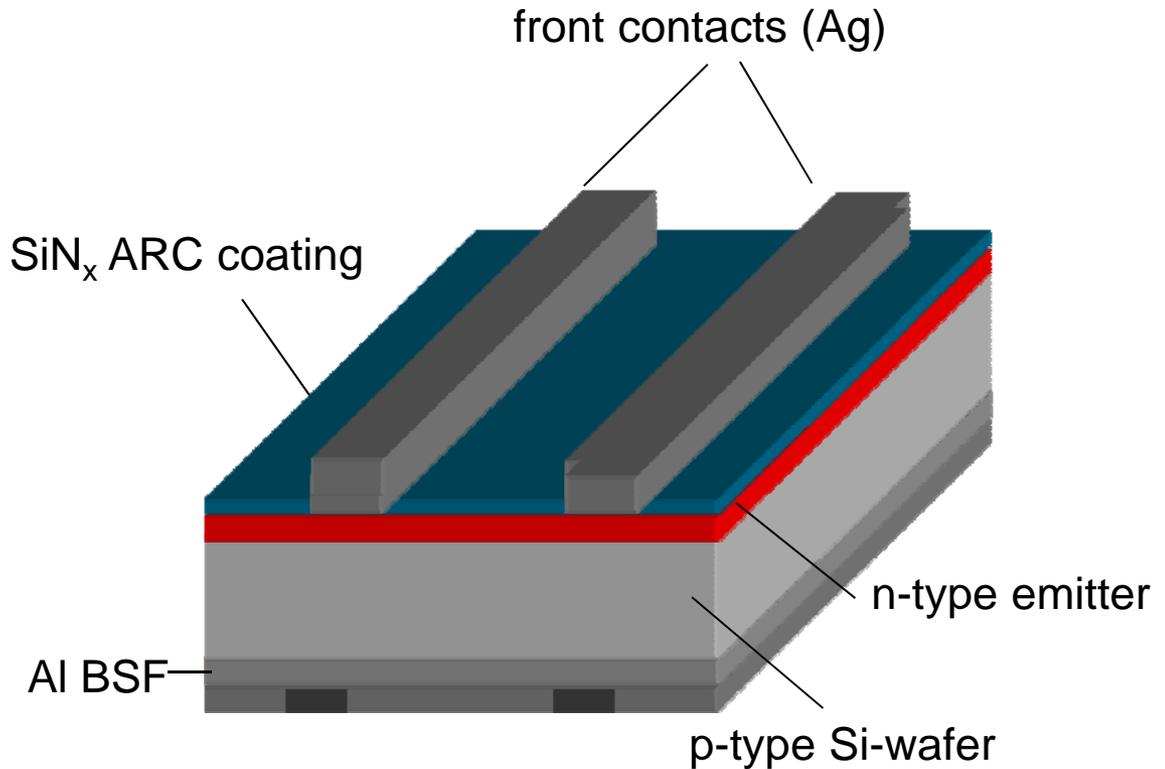


Prozessfluss



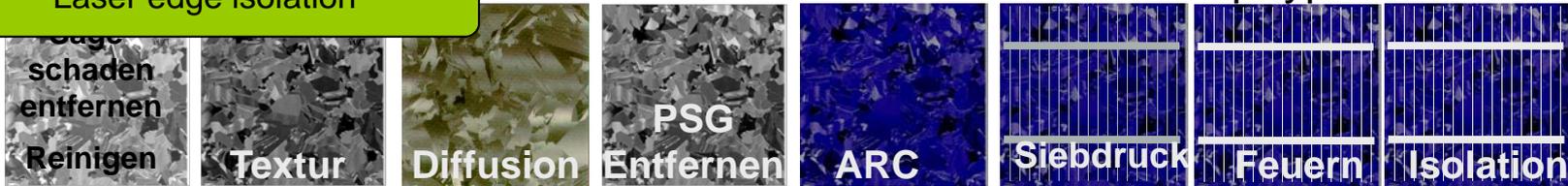
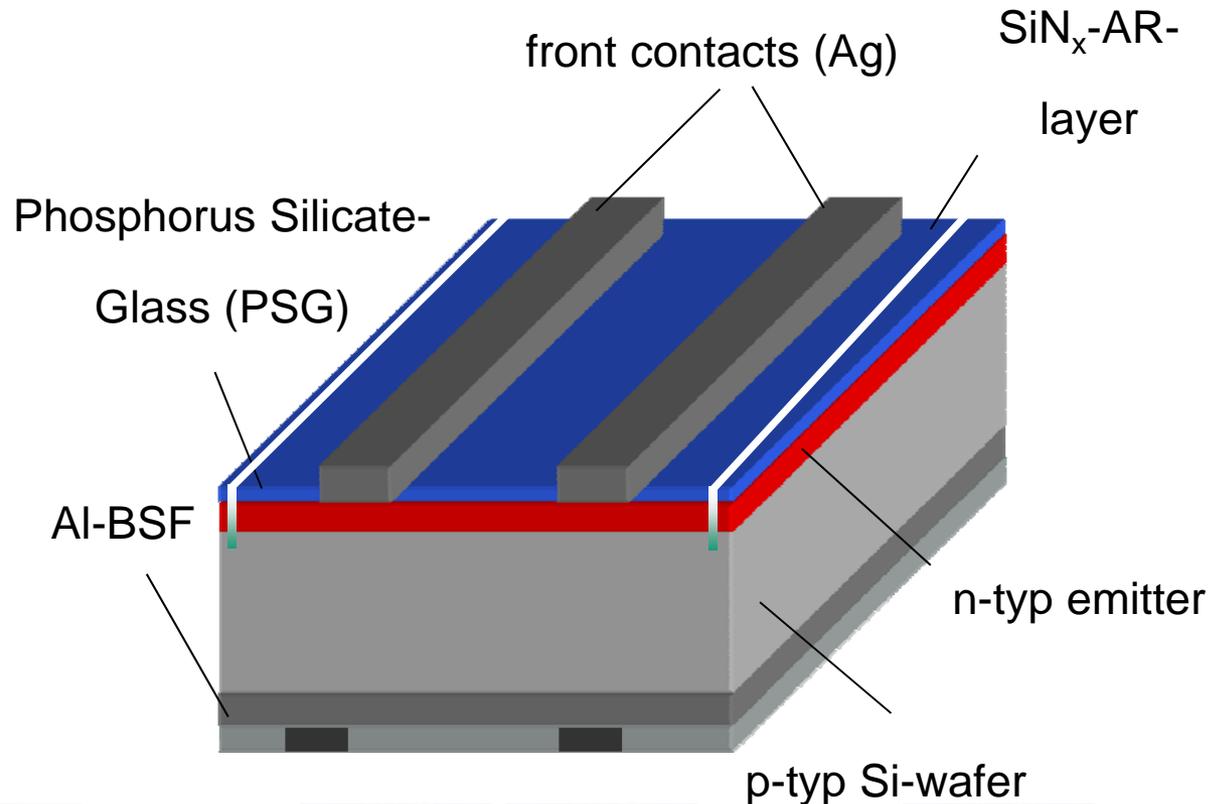
State-of-the-art industrial solar cell process

- Saw damage removal / texture and cleaning
- Deposition of dopant source
- Diffusion
- Removal of PSG and cleaning
- Deposition of SiN_x ARC-coating
- Screen printing of contacts (Al, AgAl, Ag)
- Contact firing



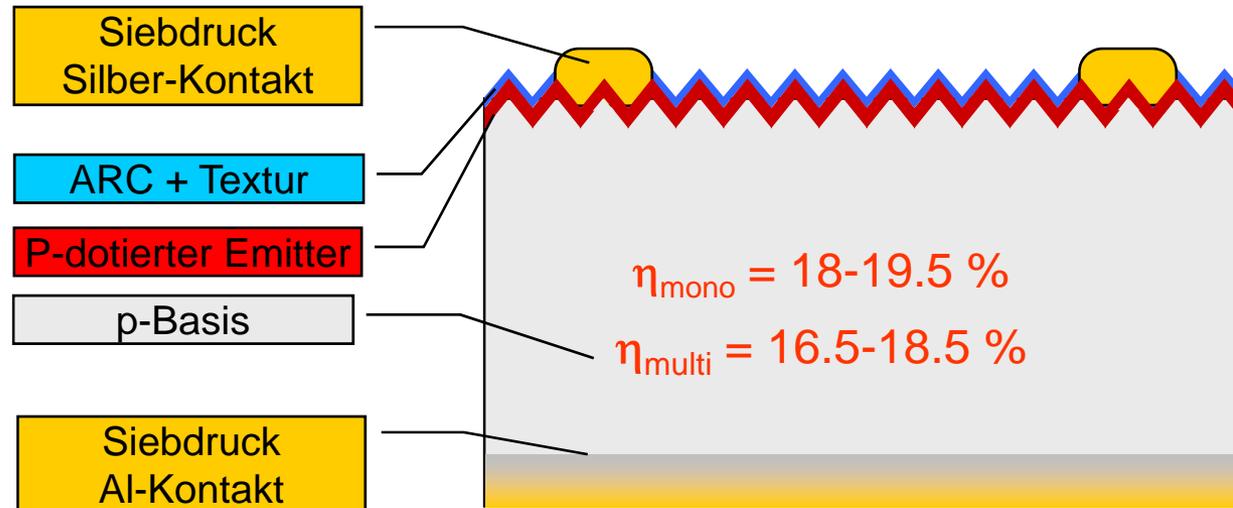
State-of-the-art industrial solar cell process

- Saw damage removal / texture and cleaning
- Deposition of dopant source
- Diffusion
- Removal of PSG and cleaning
- Deposition of SiN_x ARC-coating
- Screen printing of contacts (Al, AgAl, Ag)
- Contact firing
- Laser edge isolation

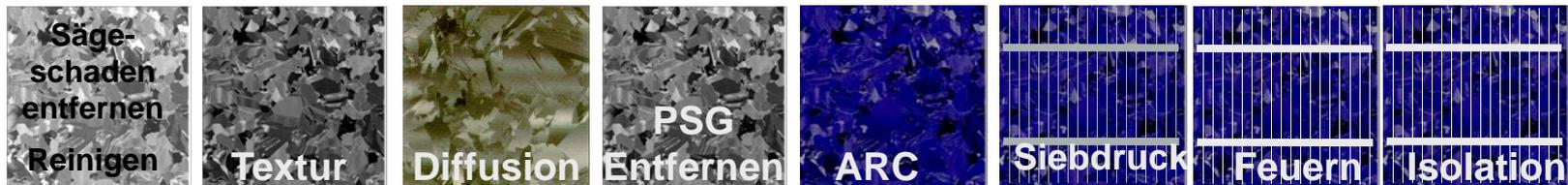


Silicium Solarzellen

Zelltechnologie – Stand der Technik



Prozessfluss → 8 Schritte



Agenda

- Aktuelle Status der Photovoltaik
- Siliciumsolarzellen: State-of-the-art Technologie
- **Technologien zur Steigerung des Wirkungsgrades**
- Zusammenfassung

Technologien zur Steigerung des Wirkungsgrades

Ziele:

- Stromgestehungskosten senken
 - Weniger Materialverbrauch
 - Höhere Wirkungsgrade

Reduzierung der Stromgestehungskosten meint Reduzierung der

- Materialkosten, Lohnkosten, Capex,
- Aber auch: Rekombinations-, Widerstands- und optischen Verluste

→ Reduzierung der Verluste

Was sind die Hauptverlust der Zelle?

Stopfen der Löcher im Eimer

Um zu wissen welches Loch man stopfen muss, muss man die Verluste kennen

→ Analyse der Verlustmechanismen notwendig



Was sind die Hauptverlust der Zelle?

Analyse der Verlustströme

j_{max} = theoretisches Maximum für eine bestimmte Waferdicke

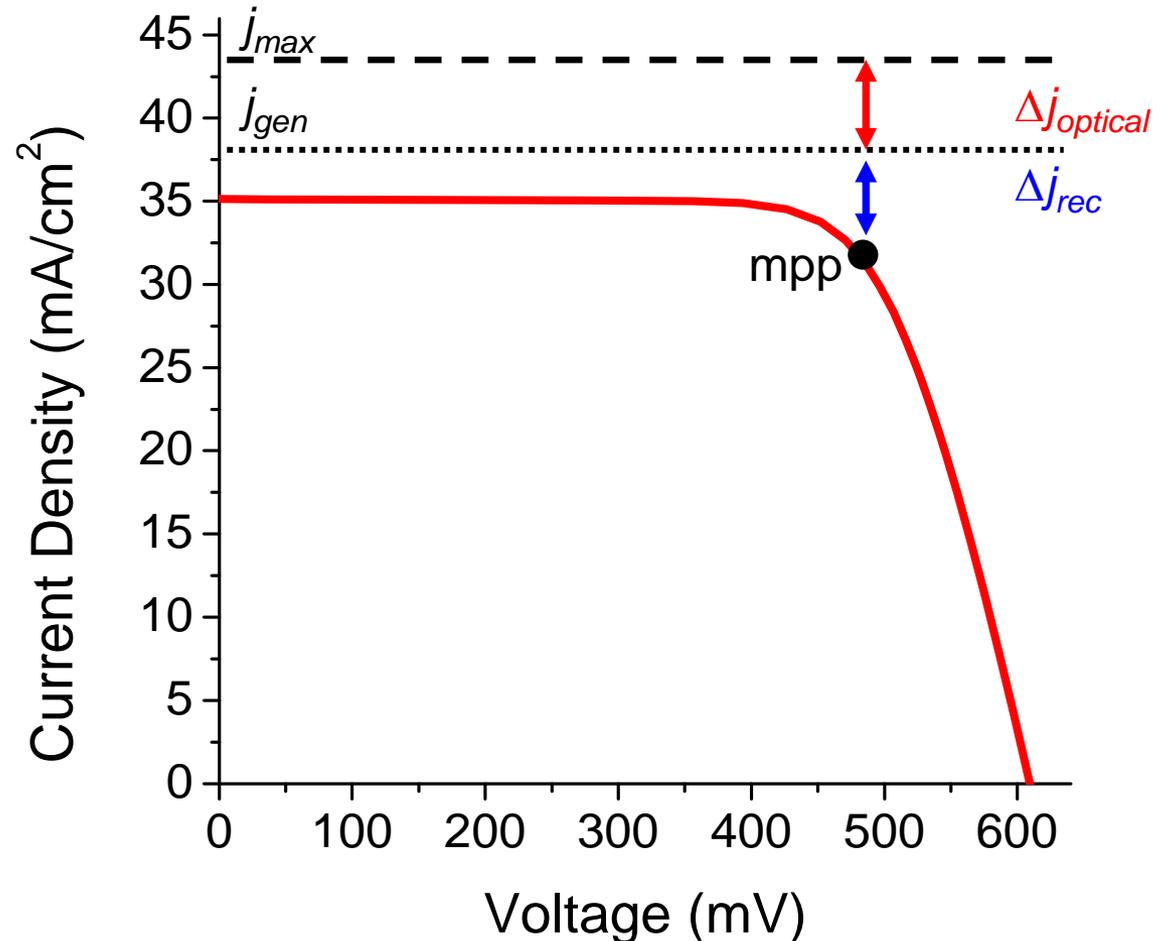
j_{gen} = Absorbierter Photonenstrom

Optischer Verlust

$$= j_{max} - j_{gen}$$

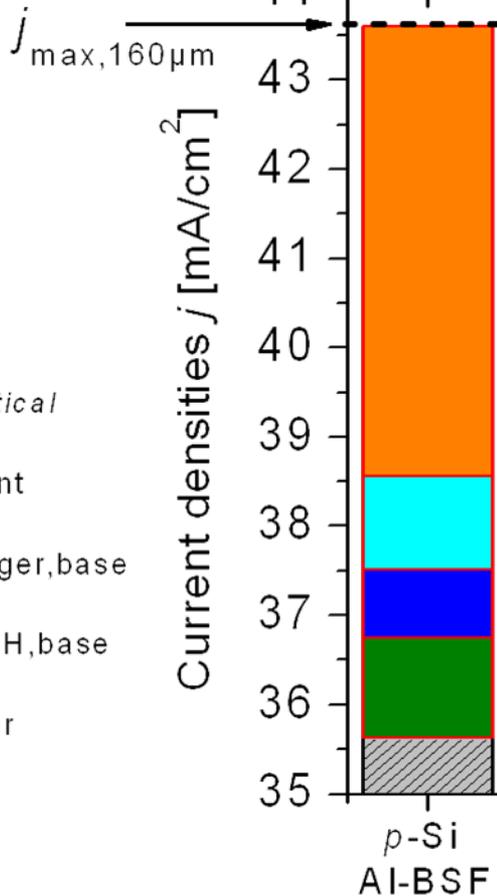
Rekombination am Punkt maximaler Leistung (MPP)

$$= j_{gen} - j_{mpp}$$



Al-BSF P-Typ Silicium

η [%]	18.4
V_{oc} [mV]	627
V_{mpp} [mV]	518
$j_{max,160\mu m}$	44

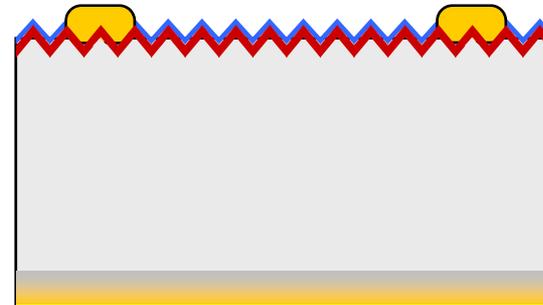


Optische Verluste

$$j_{max,160\mu m} = 43.6 \text{ mA/cm}^2$$

$j_{gen} = \text{Absorbierter Photonenstrom}$

$$\text{Optischer Verlust } \Delta j_{optical} = j_{max,160\mu m} - j_{gen}$$



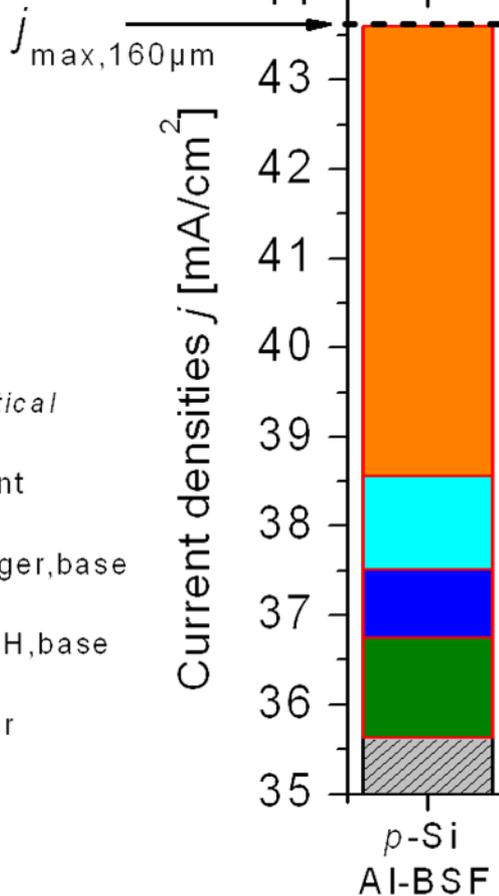
Hauptverluste:

→ Abschattung

→ Schlechte interne Reflexion

Al-BSF P-Typ Silicium

η [%]	18.4
V_{oc} [mV]	627
V_{mpp} [mV]	518
j_{max}	44



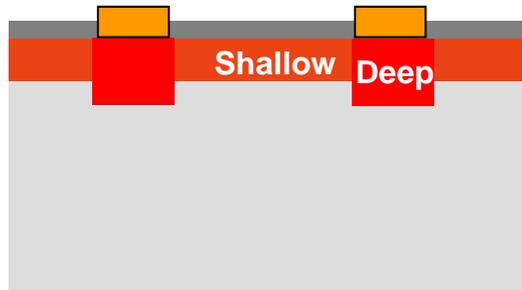
Rekombinationsverluste



Rekombination auf der Vorderseite:
Hochdotierter Emitter um Kontaktierung
mittels Siebdruck zu ermöglichen

Zellentwicklung

Selektiver Emmitter



■ $\Delta\eta = 0.3\% \dots 0.5\%$

Selektiver Emmitter:

Hochdotierte tiefe Diffusion unter den Kontakten :

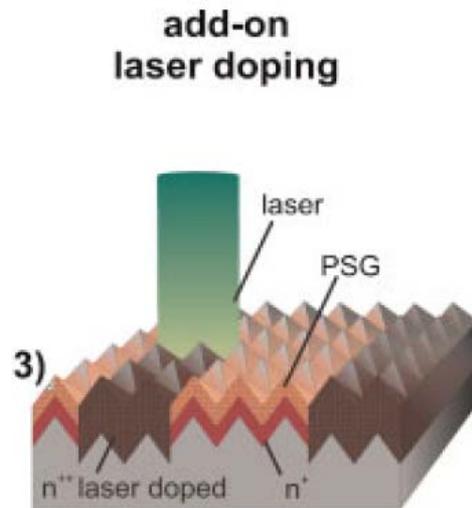
- Gute Kontaktierbarkeit
- Gute Abschirmung

Geringere Dotierung zwischen den Fingern:

- Geringe Rekombination

Zellentwicklung

Selektiver Emitter



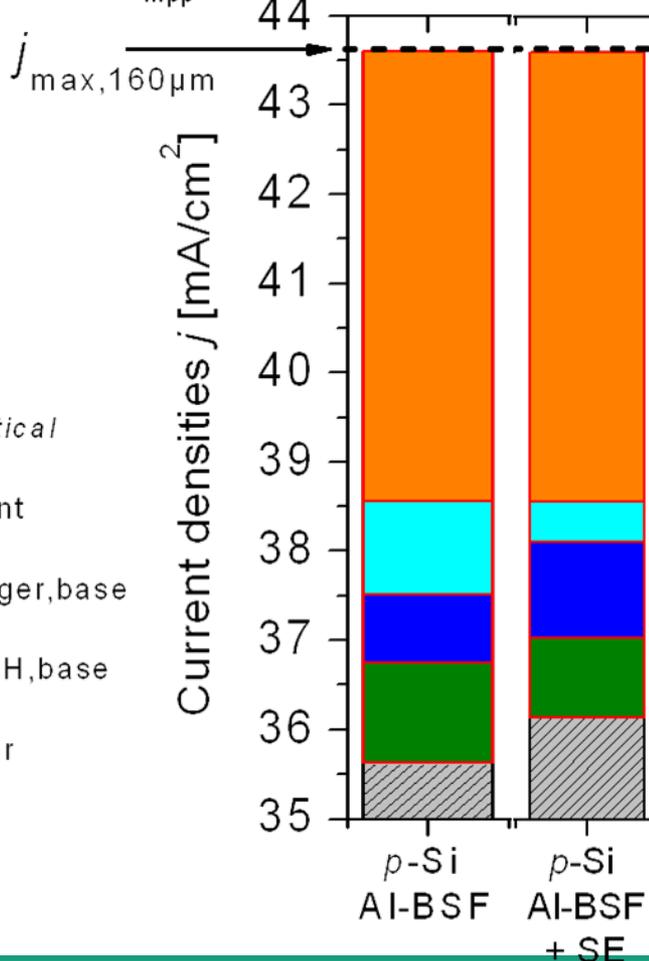
Different technological options:

- Laser over-doping from PSG
- Chemical etch-back of heavy emitter diffusion
- Implanted emitter
- Diffusion through a thin oxide opened in the finger region
- Selective laser doping from spray-on phosphorus coating
- Printing of P-dope or phosphorus-doped silicon ink
- Laser-chemical processing

Röder et al., Prog. Photovolt. 18, p. 505 (2010)

Al-BSF P-Typ Silicium + Selektiver Emitter

η [%]	18.4	19.0
V_{oc} [mV]	627	643
V_{mpp} [mV]	518	528



Optimierter Vorderseitenemitter:

→ Geringer Rekombination an der Vorderseite

Nächstes Leck:

Rekombination an der **Rückseite** und **optische Verluste**

→ Ersetzen des Al-BSF durch dielektrische Passivierung der Rückseite

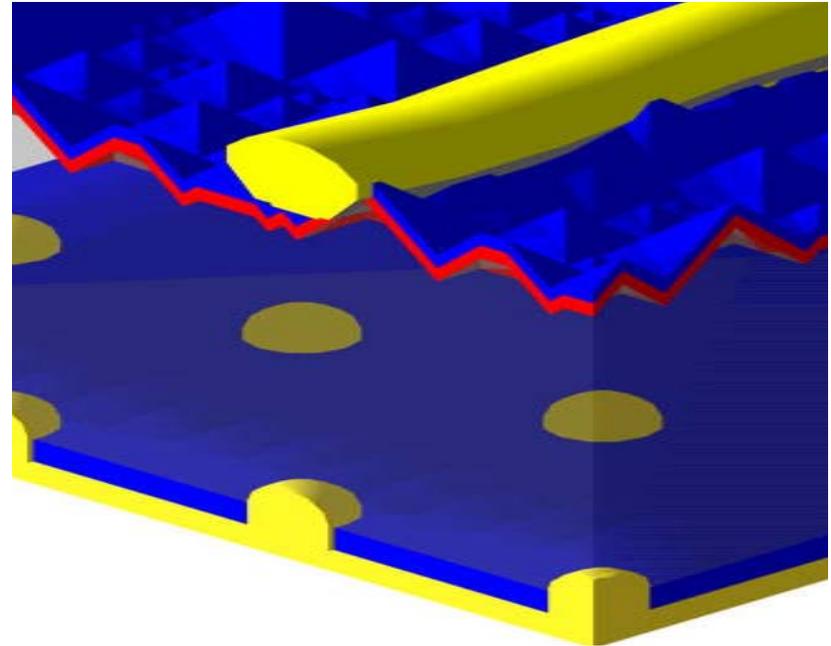
Dielektrische Rückseitenpassivierung

Lokale Kontakte

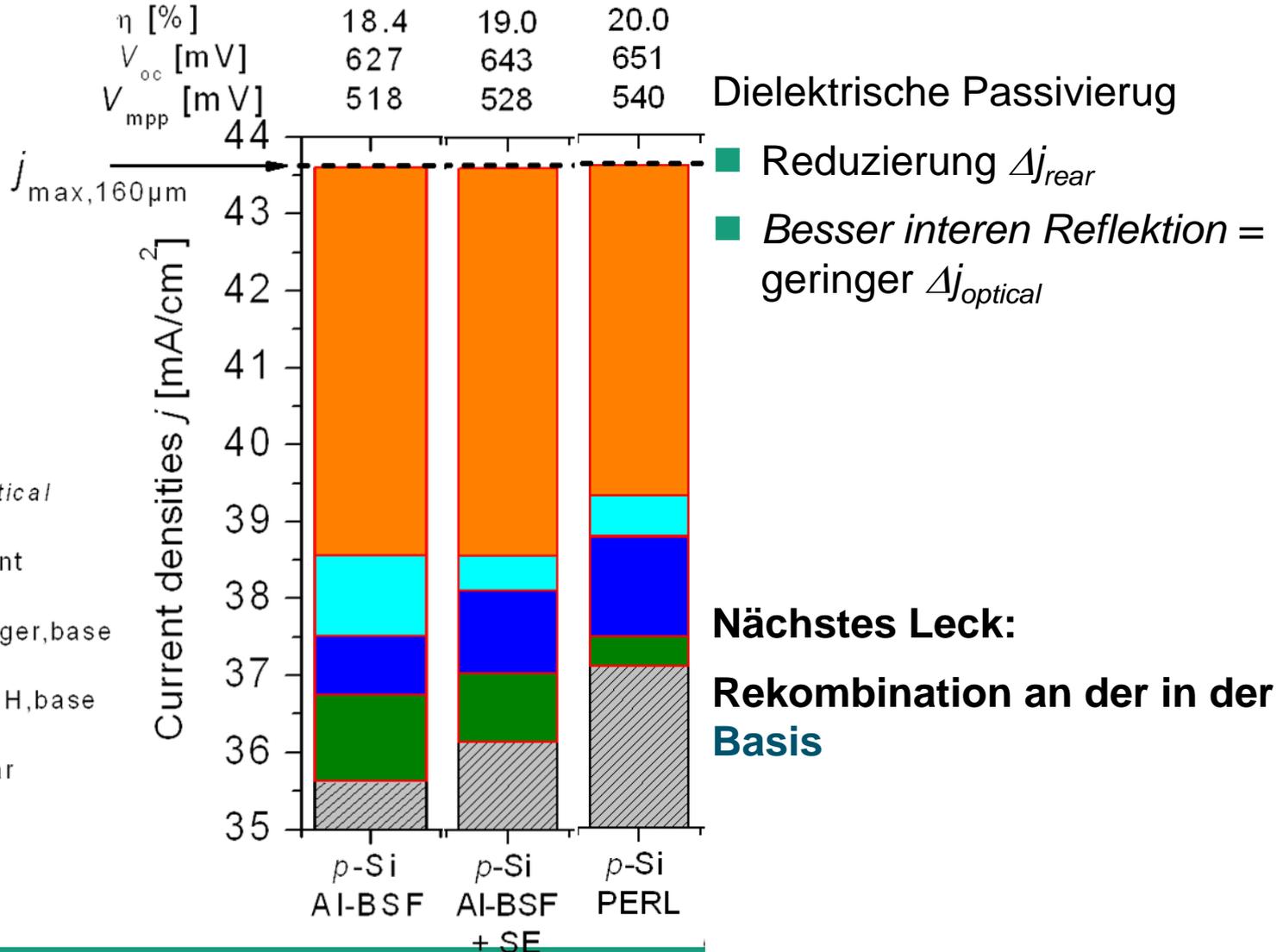
Ersetzen der ganzflächigen Metallkontaktierung durch dielektrische Passivierung und lokale Kontakte

Vorteile:

- Geringer Rekombination
- Bessere interne Reflexion



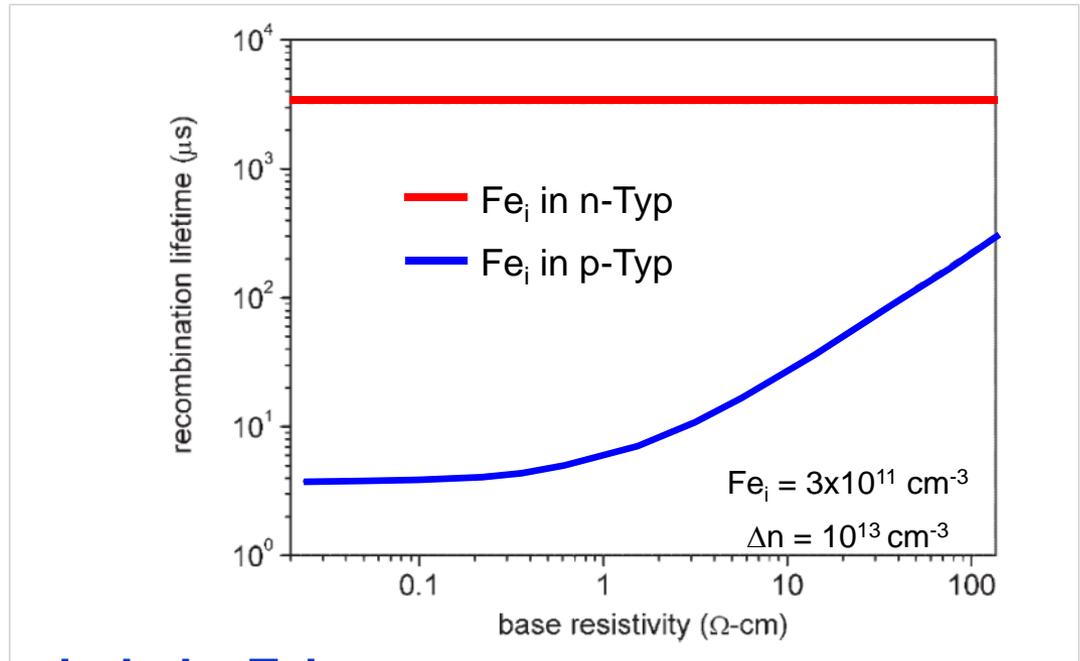
Passivierte Rückseite P-Typ Silicium



n-Typ versus *p*-Typ Silicium

Lebensdauer, Einfangsquerschnitt

- Verunreinigungen im Silicium reduzieren die Ladungsträgerlebensdauer
- Die meisten Verunreinigungen haben einen größeren Einfangsquerschnitt für Elektronen als für Löcher



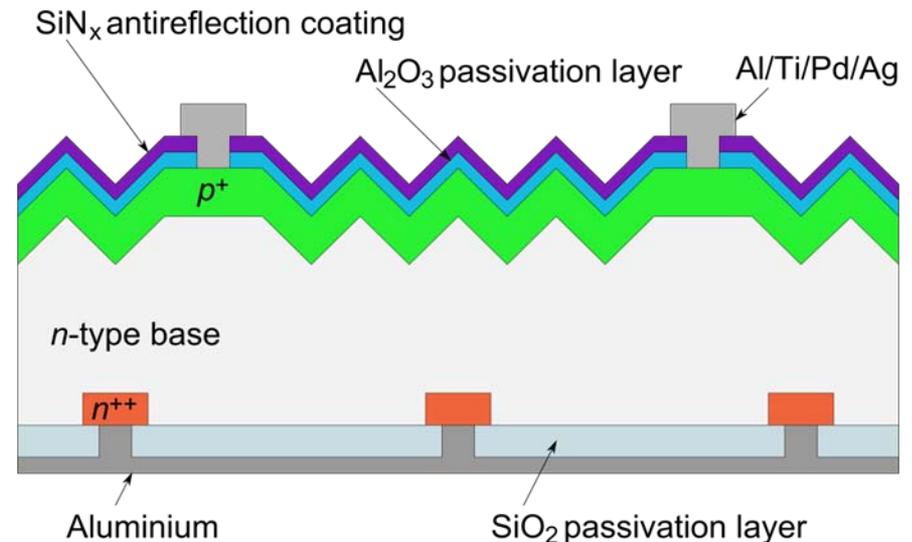
→ *n*-Typ Silicium weist eine sehr hohe Toleranz gegenüber Verunreinigungen auf

Passivierte Rückseite N-Typ Silicium

Laborergebnisse

- Alle Oberflächen passiviert
- Lokale Metallkontakte

	V_{oc}	J_{sc}	FF	η
	[mV]	[mA/cm ²]	[%]	[%]
Best cell	705	41.1	82.5	23.9*



*Confirmed at Fraunhofer ISE CaLab

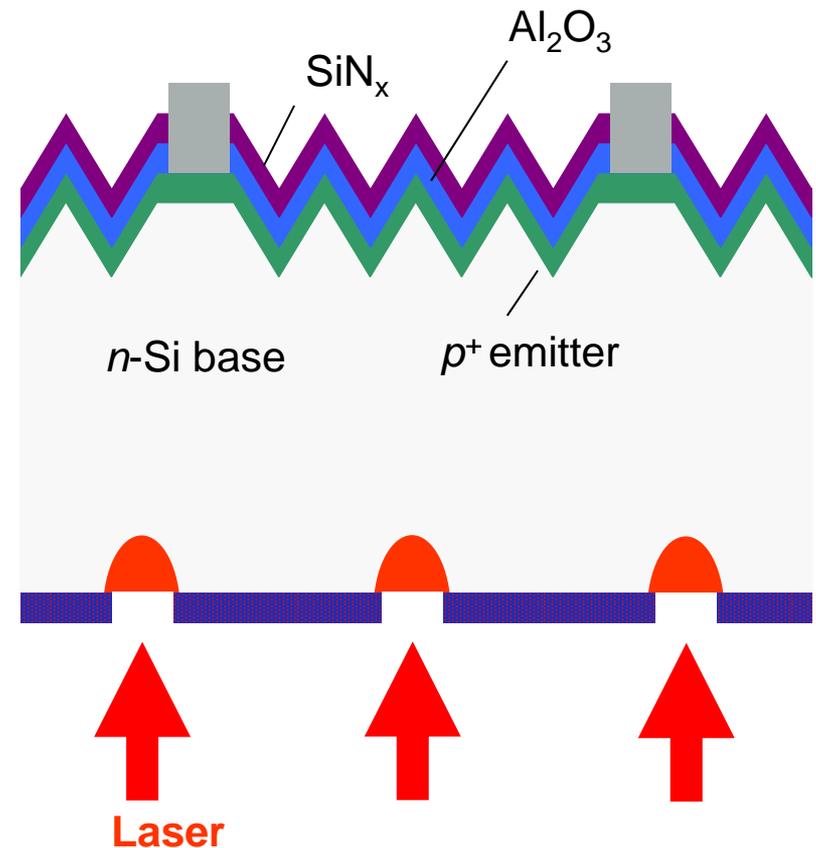
ap = aperture area
 (= bus bar included in illuminated area)

Benick et al., APL 92 p. 253504 (2008)
Glunz et al., IEEE PVSC 2010

Passivierte Rückseite N-Typ Silicium

Industrielle Umsetzung

- Lokale Laserdotierung aus der dielektrischen Passivierung heraus



D. Suwito et al., IEEE TED (2010)

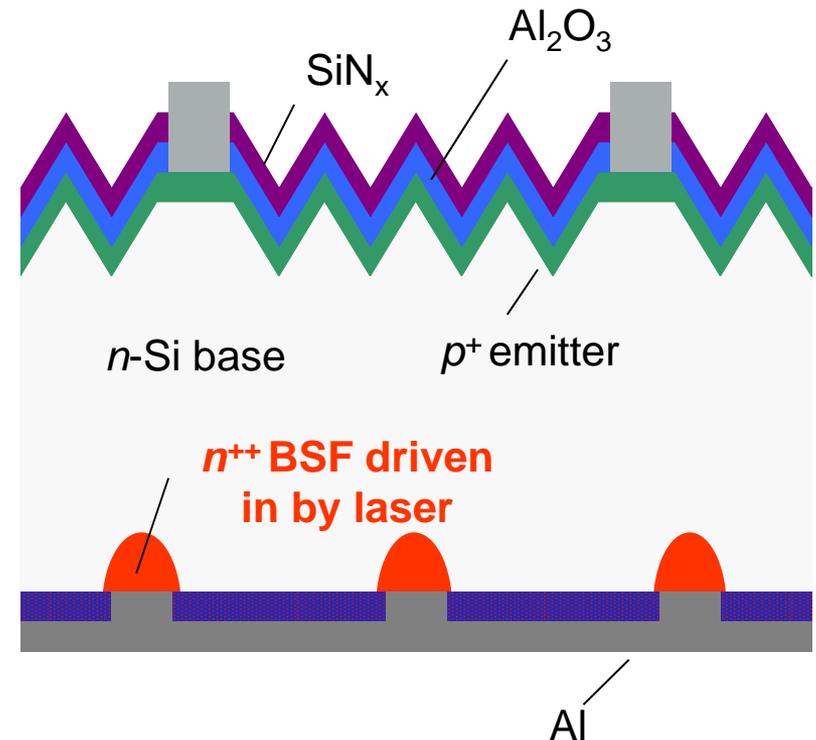
Passivierte Rückseite N-Typ Silicium

Industrielle Umsetzung

- Lokale Laserdotierung aus der dielektrischen Passivierung heraus

	V_{oc}	J_{sc}	FF	η
	[mV]	[mA/cm ²]	[%]	[%]
Best cell	701	39.8	80.1	22.4*

*Confirmed at Fraunhofer ISE Callab

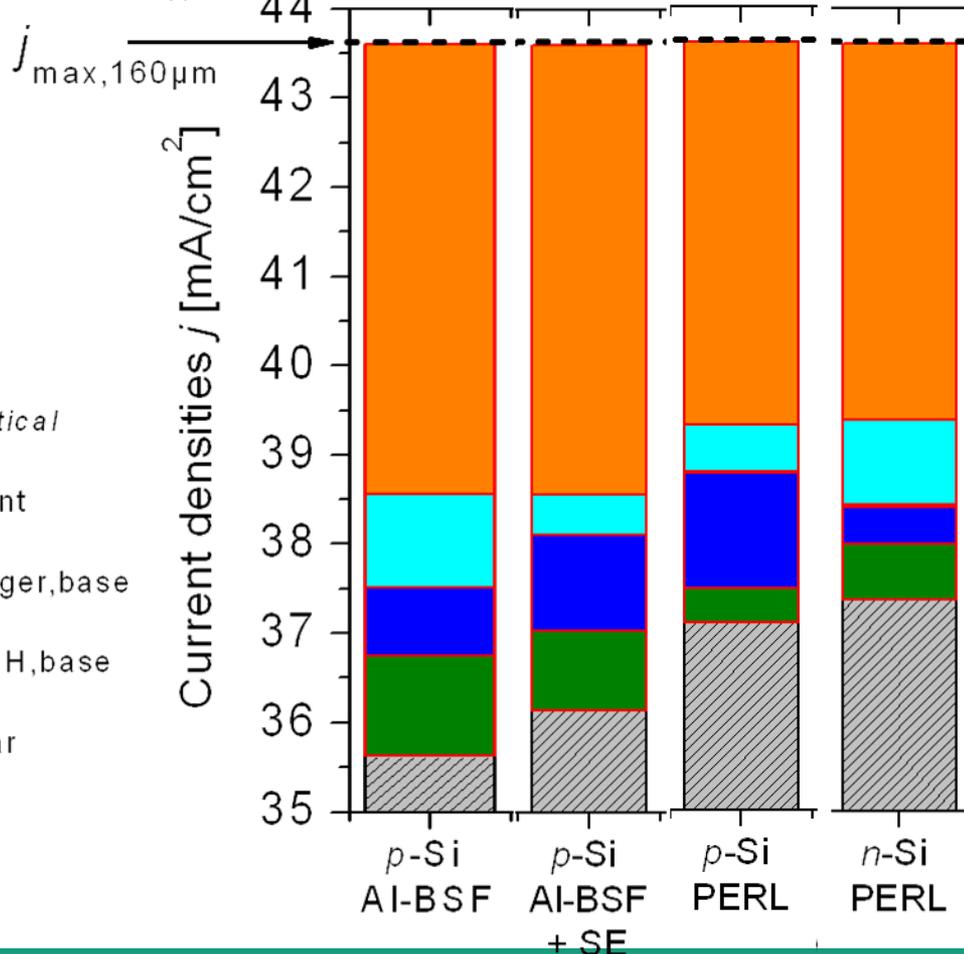


D. Suwito et al., IEEE TED (2010)

Passivierte Rückseite N-Typ Silicium

η [%]	18.4	19.0	20.0	21.3
V_{oc} [mV]	627	643	651	682
V_{mpp} [mV]	518	528	540	573

N-Typ Wafer



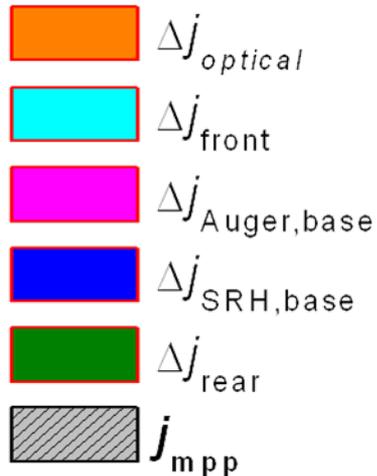
■ Reduzierung Δj_{SRH}

■ Rekombinationsverluste deutlich verringert

Nächstes Leck:

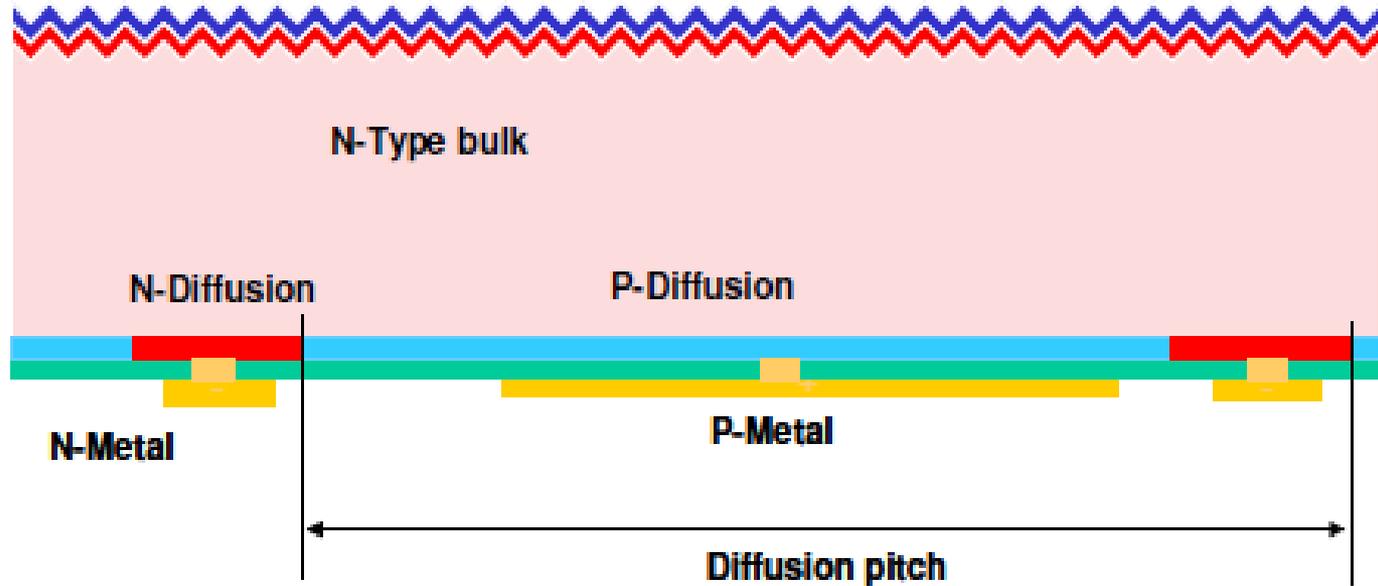
Optische Verluste

→ Reduzierung der Abschattungsverluste



Rückseitenkontaktzelle auf n-Typ Silicium

Sunpower



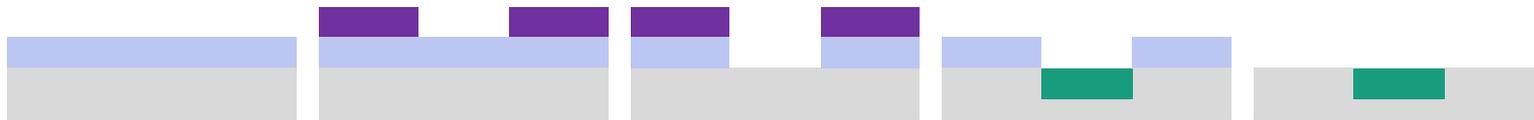
- Alle Oberflächen passiviert
 - Keine Abschattungsverluste auf der Vorderseite
- Hohe Ströme und Spannungen

Sehr komplexe Prozessierung

Rückseitenkontaktzelle auf n-Typ Silicium

Strukturierung

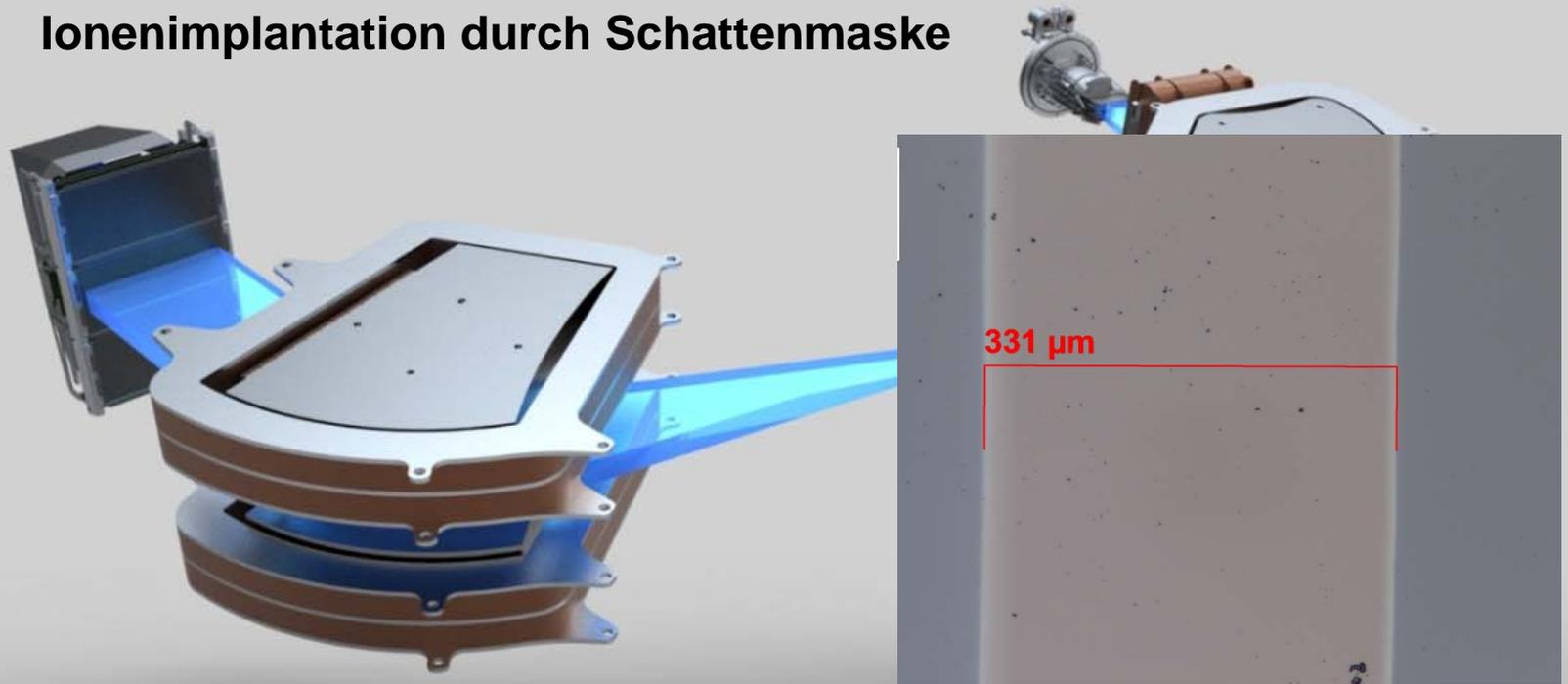
- Diffusion mit dielektrischer Maskierung (5 Prozessschritte)



Rückseitenkontaktzelle auf n-Typ Silicium

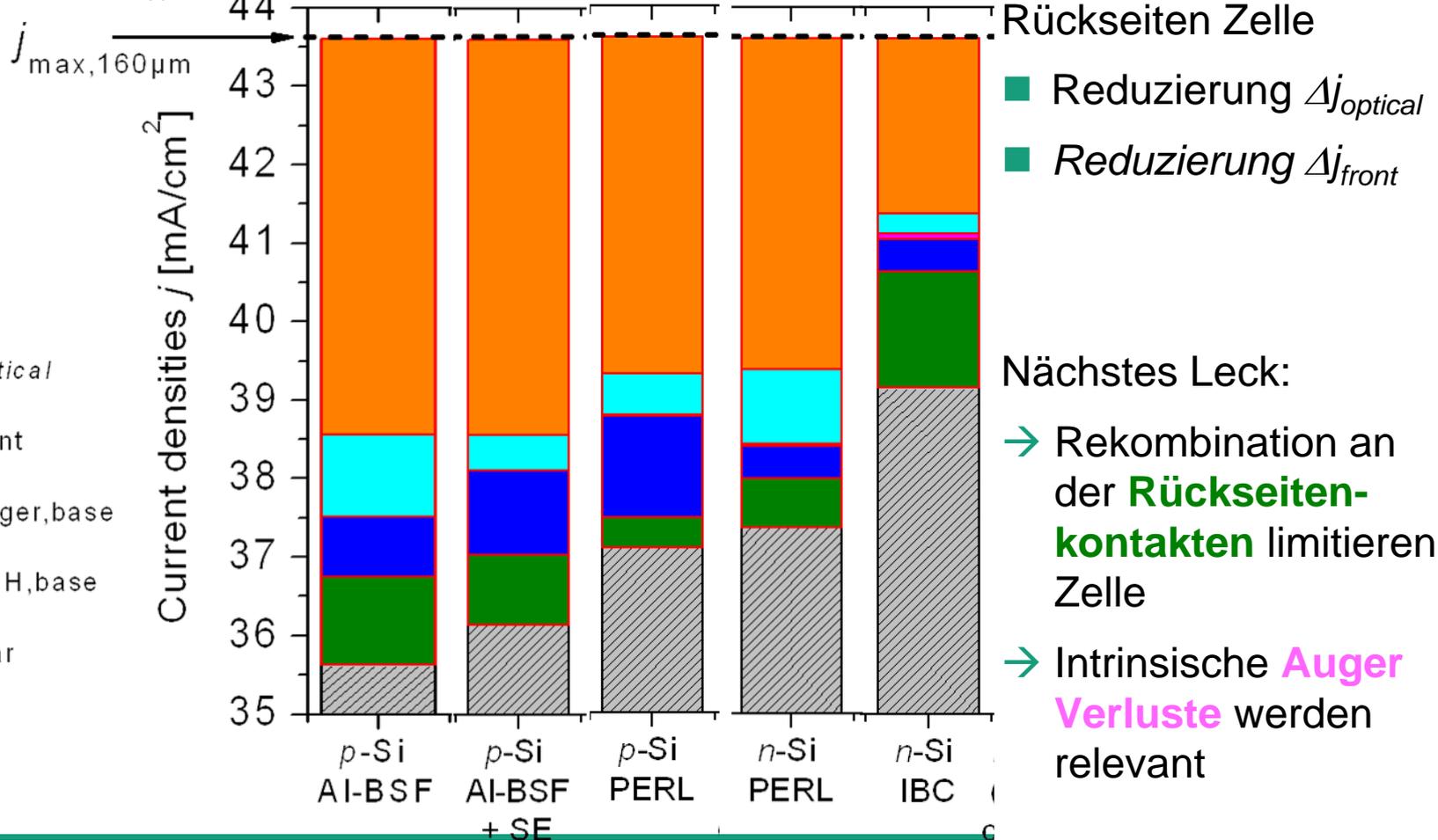
Strukturierung

Ionenimplantation durch Schattenmaske



Rückseitenkontaktzelle auf n-Typ Silicium

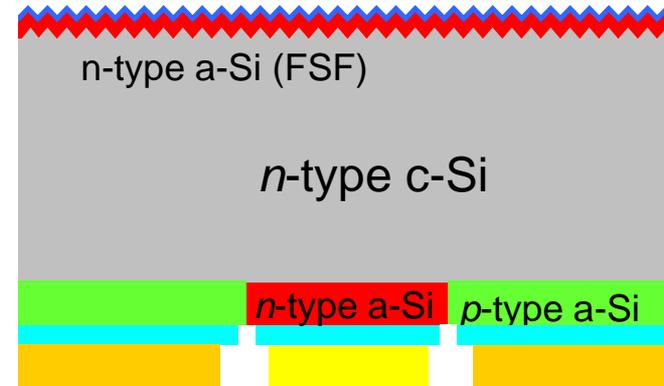
η [%]	18.4	19.0	20.0	21.3	23.0
V_{oc} [mV]	627	643	651	682	699
V_{mpp} [mV]	518	528	540	573	588



Rückseitenkontaktzelle auf n-Typ Silicium

Passivierte Kontakte

- Heterübergänge sind selektive Kontakte
- Rekombination an den Kontakten wird verhindert
- Im Labor bereits sehr gute Ergebnisse erzielt (z.B. LG Electronics²)

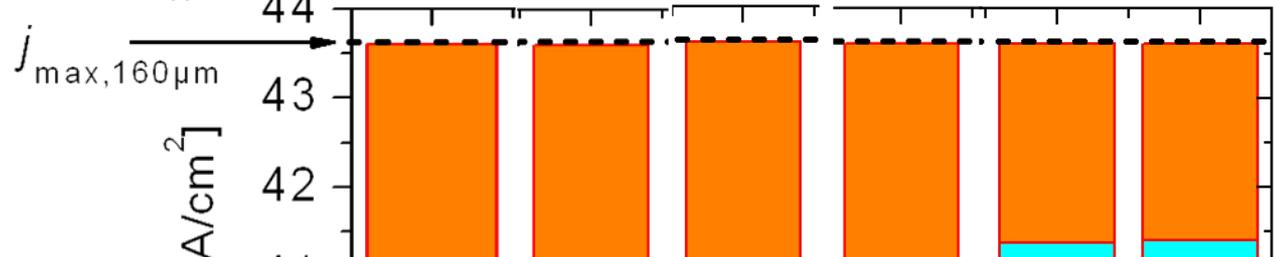


	V_{oc} [mV]	J_{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	η [%]
n-type FZ-Si 4 cm ²	723	41.8	77.4	23.4

² Choi et al., 2nd npv workshop 2012

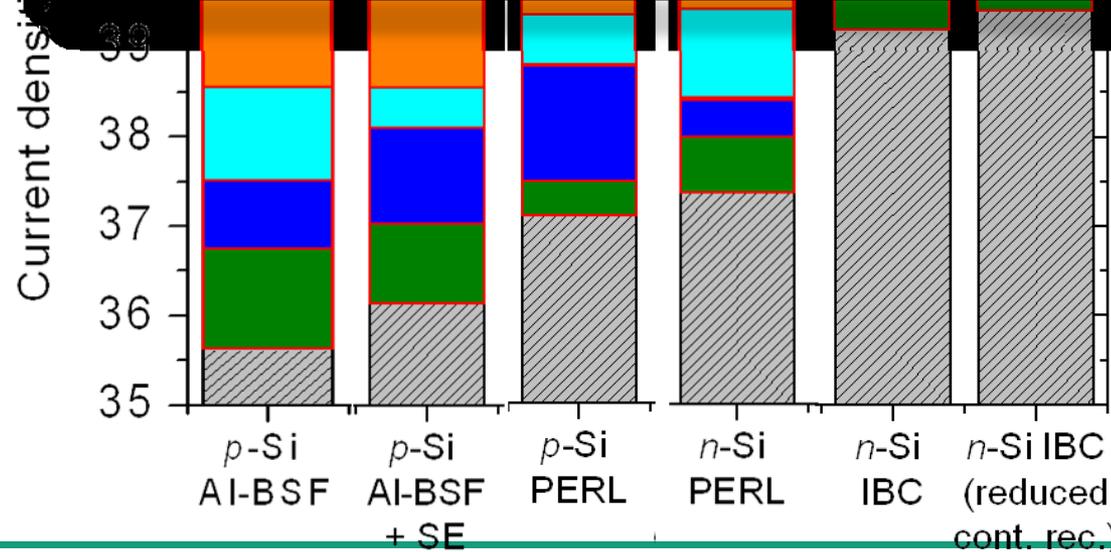
Rückseitenkontaktzelle mit Passivierten Kontakten

η [%]	18.4	19.0	20.0	21.3	23.0	24.1
V_{oc} [mV]	627	643	651	682	699	721
V_{mpp} [mV]	518	528	540	573	588	614



Ist das alles ?

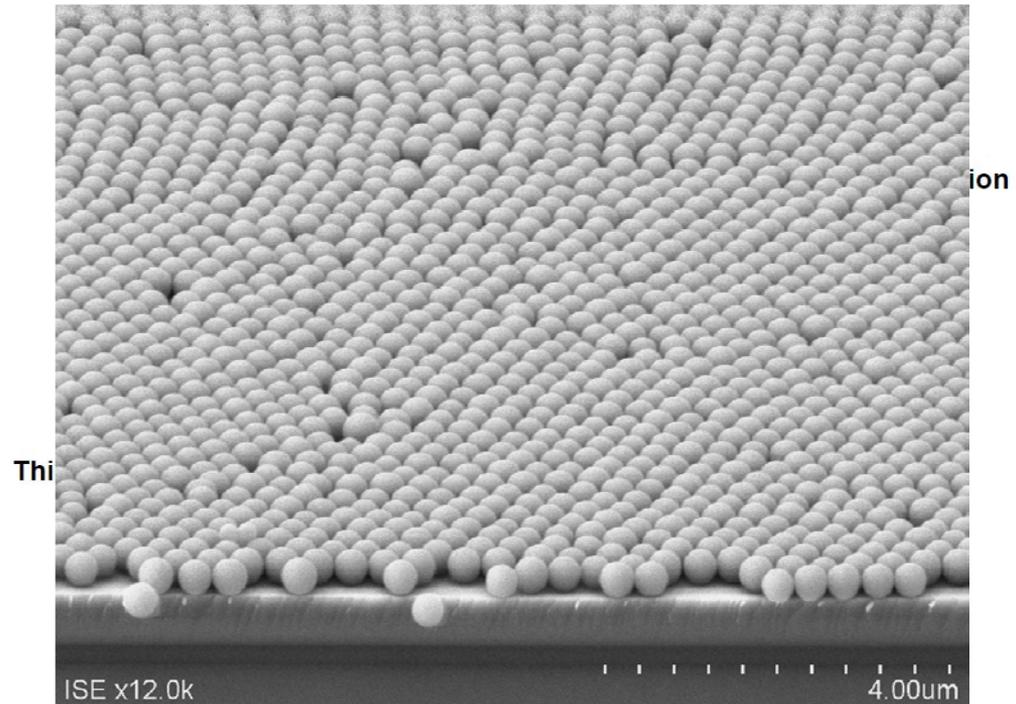
- $\Delta j_{optical}$
- Δj_{front}
- $\Delta j_{Auger,base}$
- $\Delta j_{SRH,base}$
- Δj_{rear}
- j_{mpp}



Ultra-light trapping for the next generation cells

Beugende Rückseitenstrukturen für Ultradünne Zellen

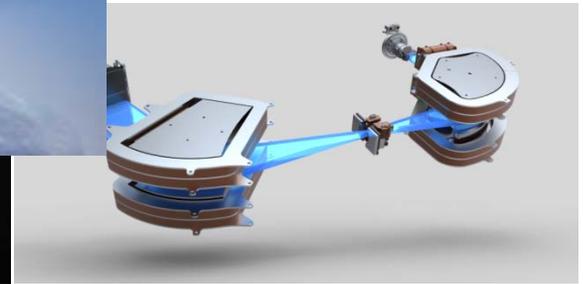
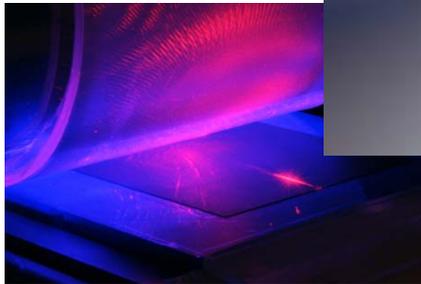
- Reduzierung der Siliciumkosten durch Verwendung ultradünner Wafer (<math><50 \mu\text{m}</math>)
- Lichtabsorption muss deutlich verbessert werden
- Beugende Strukturen führen zu deutlich höheren Lichtwegen als klassische Strukturen



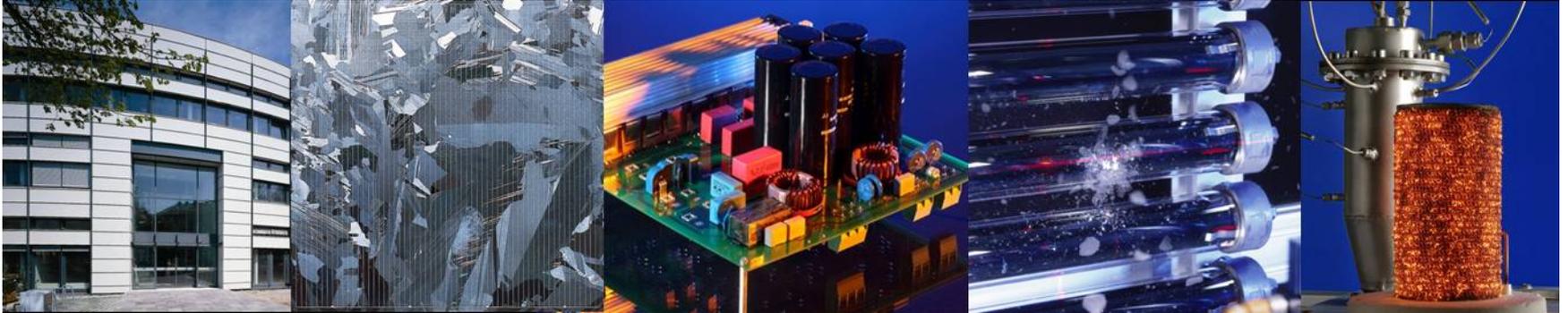
Zusammenfassung

- Siliciumsolarzellen
- Relevanter Energieertrag
- Technologischer Fortschritt
Wirkungsgrad
- Stromgestehungskosten

Es gibt noch viel zu tun



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE

Dr. Martin Hermle

martin.hermle@ise.fraunhofer.de