

---

# FÜLLEN DER LÜCKEN: DIE ENTWICKLUNG DES DESIGNS VON MODULEN MIT HOHER DICHT

## TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

---

PROF. DR. RALPH GOTTSCHALG  
UND DR. BENGT JÄCKEL



---

# ÜBERBLICK

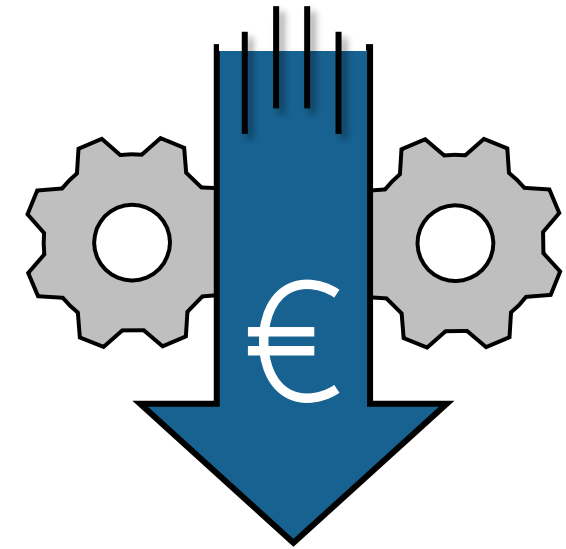
---

- Motivation
- Was bedeutet "hohe Dichte"?
- Welche Konzepte gibt es, um höhere Leistungsdichten zu erreichen?
- Vergleich der diskutierten Konzepte
- Schlussfolgerungen

# Motivation

## Kostensenkungspotenzial

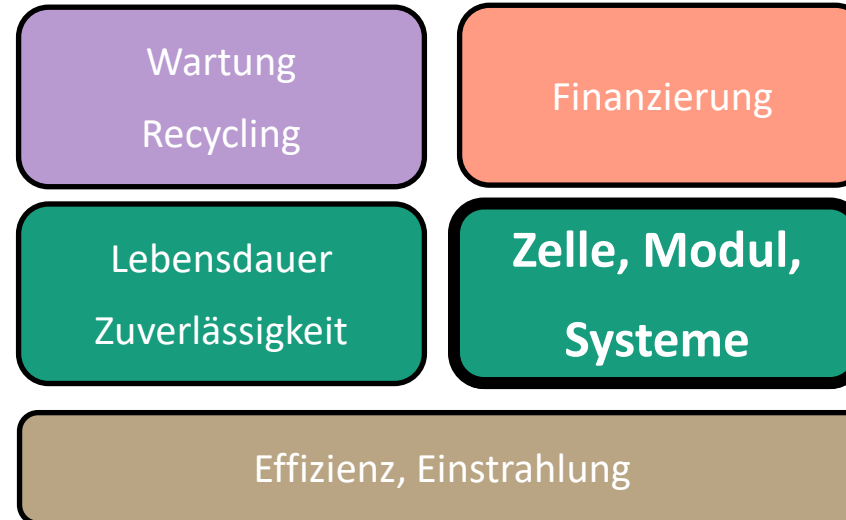
- Ziel ist es die Wettbewerbsfähigkeit oder Profitabilität einer Investition zu maximieren
- Der Endnutzer
  - verkauft kWh zu einem Preis
  - produziert kWh zu gewissen Kosten (LCOE)
  - Kritische Größe ist LCOE
- System CAPEX berechnet sich in kWp
- Zero Gap-Module haben das Potenzial für ein reduziertes LCOE



# MOTIVATION

## KOSTENSENKUNGSPOTENZIAL

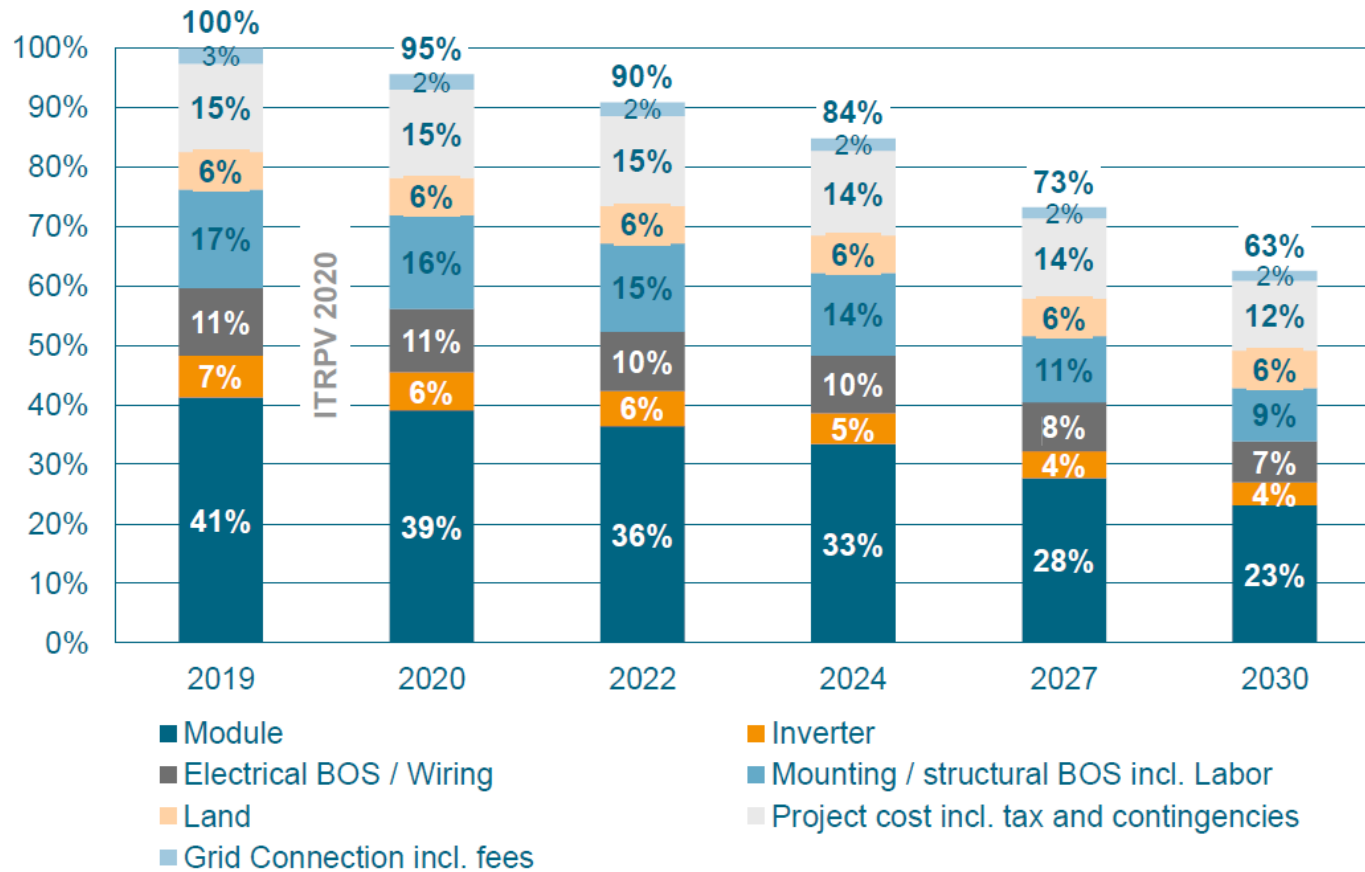
$$LCOE_{PV} = \frac{I_{PV} + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t} + R_n}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{el} \times (1 - d_{PV})^t}{(1+i)^t}}$$



- $I_{PV}$ : Investitionskosten
- $A_t$ : Jährliche Gesamtkosten
- $R_n$ : Umzugskosten
- $n$ : Lebensdauer in Jahren
- $M_{el}$ : Stromleistung
- $d_{PV}$ : Degradationsrate
- $i$ : Diskontsatz
- $t$ : Betriebsjahr

# MOTIVATION

## CAPEX KOSTENSENKUNGSPOTENZIAL



■ Grundstückskosten - konstant

■ Montage - nahezu konstant

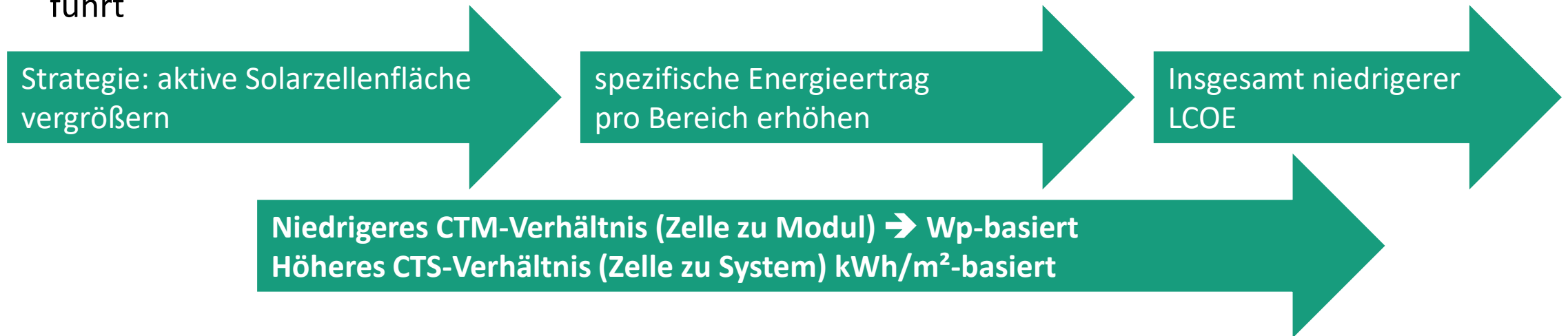
➔ **effizientere Module** können die Installationskosten senken

ITRPV 2020

# DER WEG ZU PV-MODULEN MIT HOHER DICHTE

## WAS BEDEUTET HOHE DICHTE?

- Die PV-Industrie ist an Watt-Peak gewöhnt!
- Die PV-Herstellungsindustrie wird in Watt-Peak "bezahlt"!
- ABER: Eigentümer und Investoren werden in kWh oder kWh/m<sup>2</sup> "bezahlt".
- Hohe Dichte für PV-Module: Höchstmöglicher Watt-Peak pro Fläche, der zum höchsten Energieertrag führt



---

# DER WEG ZU PV-MODULEN MIT HOHER DICHTE: WIRKUNGS-GRAD UND AKTIVE FLÄCHE DER SOLARZELLEN ERHÖHEN

---

## ■ Wirkungsgrad von Solarzellen erhöhen:

- Heute typischerweise Mono-Material, Übergang zu n-Typ-Silizium
- Reduzierte optische und ohmsche Verluste durch Mehrfach sammelschienen-/Drahtverbindungen (Modul)
- Rückkontaktzellen oder Heteroübergangssolarzellen, bifazial

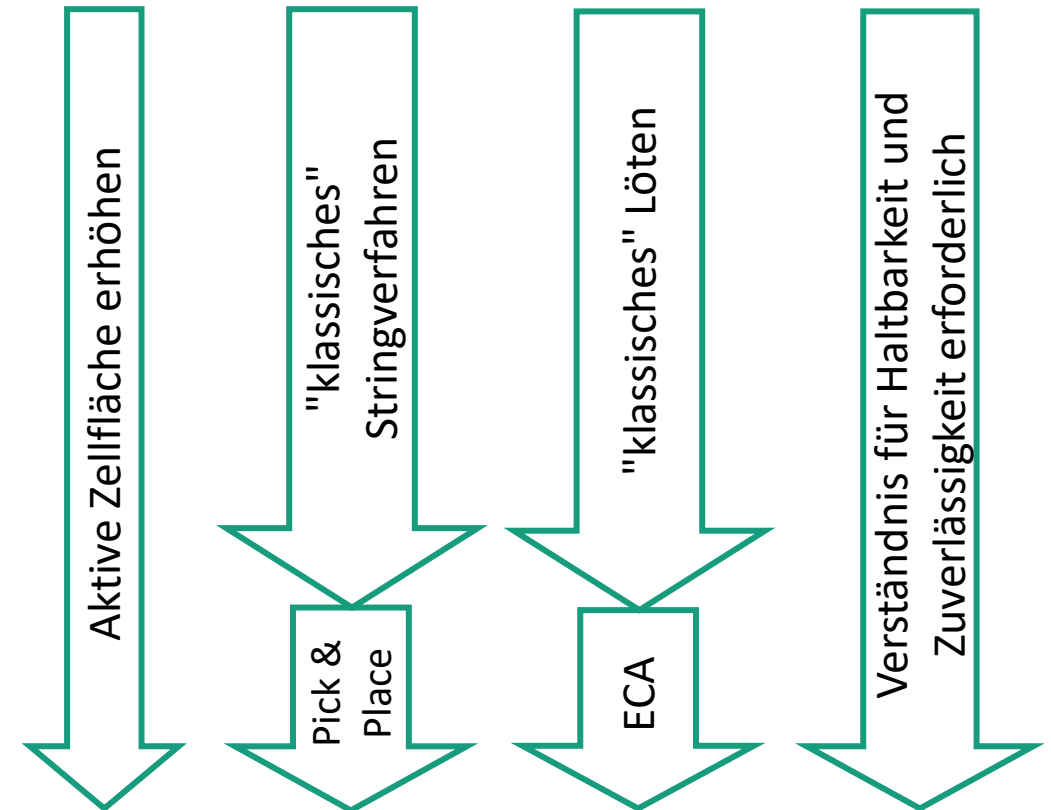
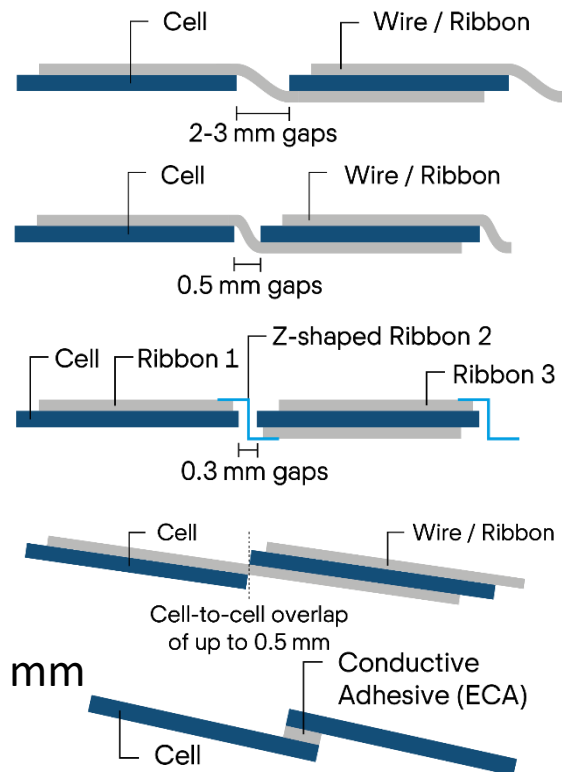
## ■ Effizienz von PV-Modulen erhöhen

- Zellabstände und die optische Kopplung von Materialien optimieren, um so viel Licht wie möglich zu sammeln
- Geschnittene Zellen - typischerweise "halbgeschnitten"- potenzieller Trend zum „Drittelschnitt“
- Verwendung z.B. hochreflektierender Rückseitenfolien, UV-durchlässiger Einkapselungen, lichteinfangender Bänder
- Zusätzliche Leistungssteigerung durch die Verwendung bifazialer Solarzellen und geeigneter transparenter Rückseitenfolien

# DER WEG ZU PV-MODULEN MIT HOHER DICHTE: WIRKUNGS-GRAD UND AKTIVE FLÄCHE DER SOLARZELLEN ERHÖHEN

## ■ Effizienz von PV-Modulen erhöhen → Zellabstände optimieren

- Standard
  - 2 -5mm Abstand
- Small Gaps
  - 2-0.5 mm Abstand
- Paving
  - Zstzl. gefaltetes Bändchen
- Zero Gap
  - Überlappung: 0.2-0.5 mm
- Shingled cells
  - Überlappung: 0.5-1.0 mm





---

# DER WEG ZU PV-MODULEN MIT HOHER DICHTe

## HERAUSFORDERUNGEN

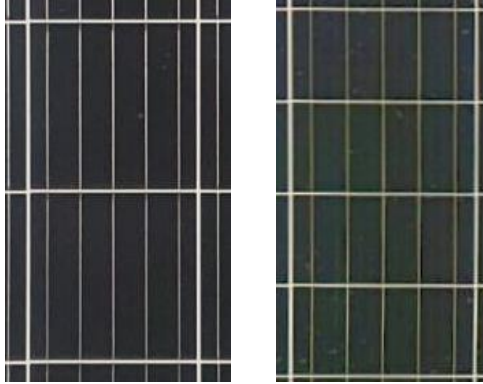
---

- Standard: Gut verstanden - seit Beginn der Industrie entwickelt
- Small Gaps and Paving:
  - Fortschrittlicheres Stringverfahren – Multi-Bänder erforderlich
  - Erhöhtes Zellbruchrisiko aufgrund von Zellverbindungen ⇒ Laminierungsprozess
- Zero Gap
  - „Quasi-“Standard-Stringverfahren
  - Optimierter Laminierungsprozess erforderlich
- Shingled cells
  - Mehrfach geschnittene Zellen - typischerweise 1/5 oder 1/6
  - Pick & Place-Verfahren
  - ECA als Zellverbindungsmaterial verwendet (ECA-Anwendung durch Dispenser oder Siebdruckverfahren)

# DER WEG ZU PV-MODULEN MIT HOHER DICHTE

## OPTISCHES ERSCHEINUNGSBILD

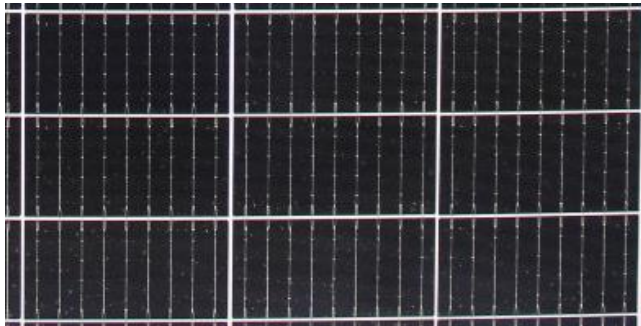
■ Standard



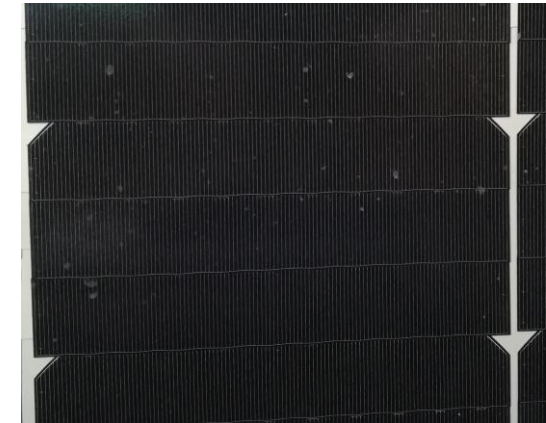
■ Zero-Gap



■ Smaller Gaps, Multi-Busbar

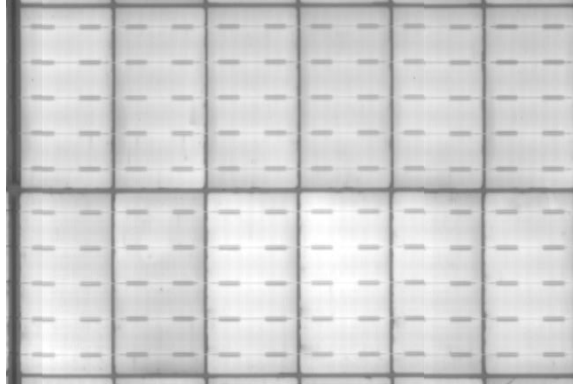
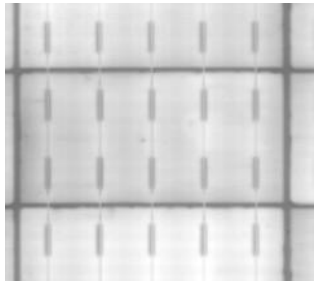


■ Shingled cells

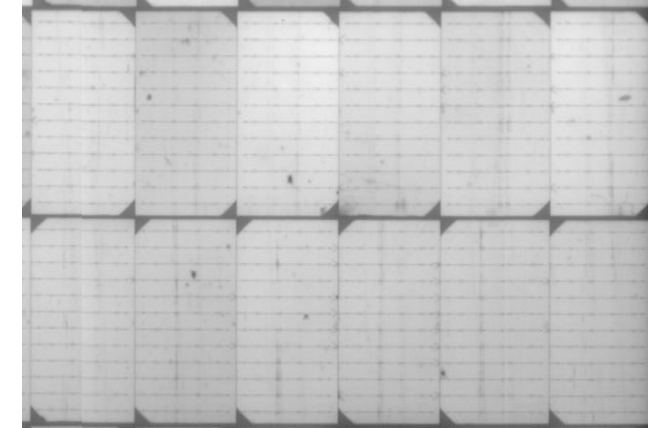
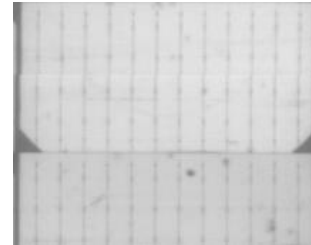


# DER WEG ZU PV-MODULEN MIT HOHER DICHTE ELEKTROLUMINESZENZ

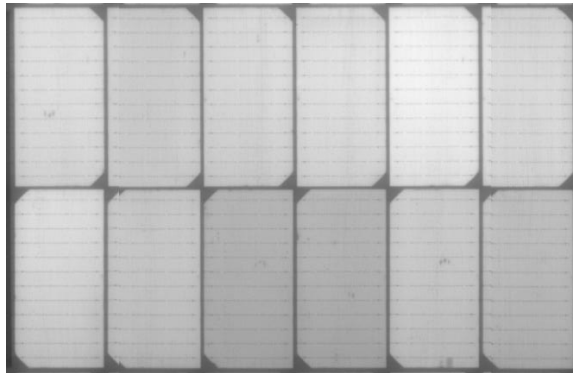
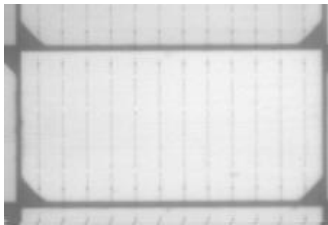
■ Standard



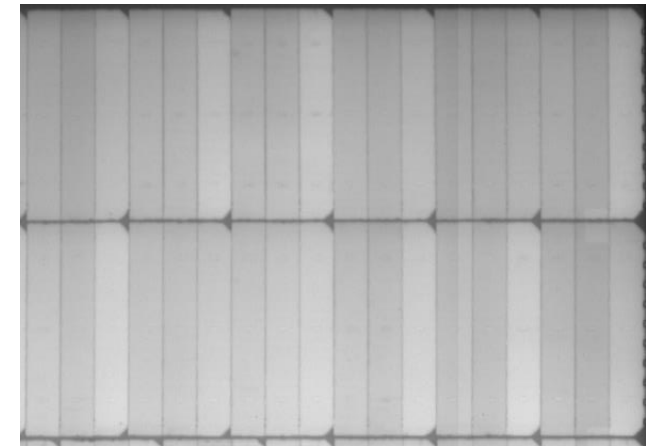
■ Zero-Gap



■ Smaller Gaps, Multi-Busbar



■ Shingled cells



# DER WEG ZU PV-MODULEN MIT HOHER DICHTE

## MARKT: $W_p$ FÜR VERSCHIEDENE DESIGNS/FARBEN

Standard	Small Gaps and Paving	Zero Gap	Shingled Cells	Großzellenmodule
weiß ~400Wp	~450Wp	QCells XL weiß ~460Wp	weiß ~410Wp	→ auf 210mm geschnittene Zellen weiß 500Wp
schwarz ~ 325Wp		QCells weiß ~390Wp		
		QCells schwarz ~385Wp		
		Andere weiß ~460Wp		
		Andere schwarz ~ 380Wp		

# DER WEG ZU PV-MODULEN MIT HOHER DICHTE

MARKT:  $W_p \rightarrow W_p/m^2$

Typ	Design/Leistung	Größe
Standard	weiß ~400Wp schwarz ~ 325Wp	~ 2.01m <sup>2</sup> ~ 1.70m <sup>2</sup>
Small Gaps and Paving	~450Wp	~ 2.17m <sup>2</sup>
Zero Gap	QCells XL weiß ~460Wp QCells weiß ~390Wp QCells schwarz ~385Wp Andere weiß ~460Wp Andere schwarz ~ 380Wp	~ 2.22m <sup>2</sup> ~ 1.89m <sup>2</sup> ~ 1.89m <sup>2</sup> ~ 2.24m <sup>2</sup> ~ 1.91m <sup>2</sup>
Shingled Cells	weiß ~410Wp	~ 2.08m <sup>2</sup>
Großzellenmodule → auf 210mm geschnittene	weiß 500Wp	~ 2.39m <sup>2</sup>

# DER WEG ZU PV-MODULEN MIT HOHER DICHTE

MARKT:  $W_p \rightarrow W_p/m^2$

Typ	Design/Leistung	Größe	Wp/m <sup>2</sup>
Standard	weiß ~400Wp schwarz ~ 325Wp	~ 2.01m <sup>2</sup> ~ 1.70m <sup>2</sup>	199,0 Wp/m <sup>2</sup> (w) 191,1 Wp/m <sup>2</sup> (b) → "Schwarzverlust" ~3-4%
Small Gaps and Paving	~450Wp	~ 2.17m <sup>2</sup>	207,3 Wp/m <sup>2</sup> → Zugewinn von ~3-4% (w)
Zero Gap	QCells XL weiß ~460Wp QCells weiß ~390Wp QCells schwarz ~385Wp Andere weiß ~460Wp Andere schwarz ~ 380Wp	~ 2.22m <sup>2</sup> ~ 1.89m <sup>2</sup> ~ 1.89m <sup>2</sup> ~ 2.24m <sup>2</sup> ~ 1.91m <sup>2</sup>	207,2 Wp/m <sup>2</sup> → Zugewinn von ~3-4% (w) 206,4 Wp/m <sup>2</sup> → Zugewinn von ~3-4% (w) 203,7 Wp/m <sup>2</sup> → <u>Zugewinn von ~6-7% (b)</u> 205,3 Wp/m <sup>2</sup> → Zugewinn von ~3-4% (w) 198,9 Wp/m <sup>2</sup> → Zugewinn von ~4-5% (b)
Shingled Cells	weiß ~410Wp	~ 2.08m <sup>2</sup>	197,1 Wp/m <sup>2</sup> → ähnlich zum Standard (w)
Großzellenmodule → auf 210mm geschnittene	weiß 500Wp	~ 2.39m <sup>2</sup>	209,2 Wp/m <sup>2</sup> → zstzl. Gewinn durch Größe

---

# SCHLUSSFOLGERUNGEN

## LÜCKENLOSE MODULE

---

- Höchste Leistungsdichte anzeigen ( $\text{Wp}/\text{m}^2$ )
- Hochdichte Leistungsmodule reduzieren:
  - Anzahl der Module pro installiertem kWp
  - Erforderliche Land- oder Dachfläche
  - Montagestruktur und Arbeitskosten
  - CAPEX; kann den LCOE senken (abhängig von Cent/Wp)
- Neue Herausforderungen in den Bereichen Fertigung und Zuverlässigkeit

Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!

