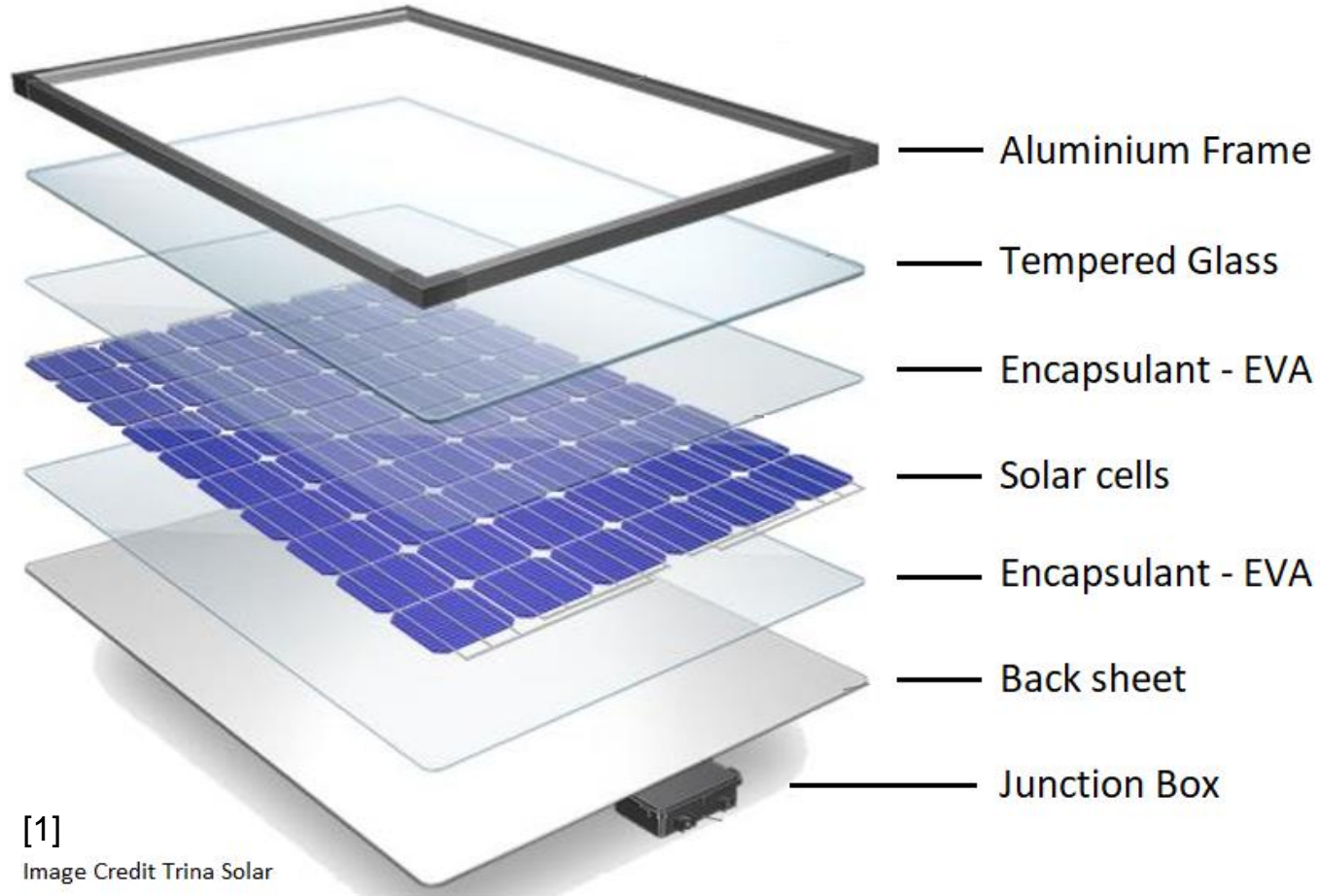


# Silberfreie Solarzellmetallisierung und Entwicklung von Verbindungstechnologien

C. Hollemann, M. Brinkmann, B. Min,  
H. Schulte-Huxel

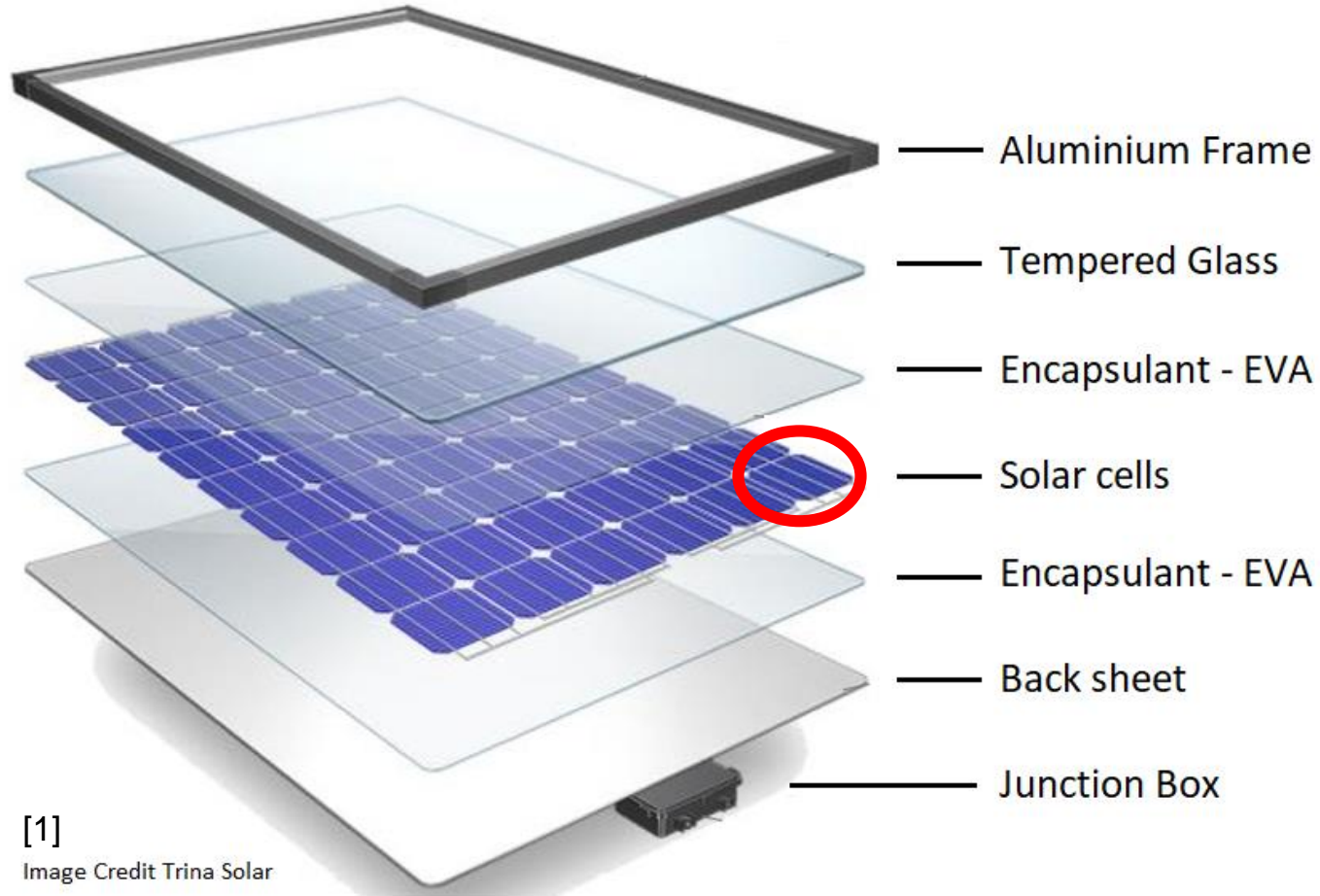
Institut für Solarenergieforschung GmbH

# Wo wird Silber im PV-Module eingesetzt?



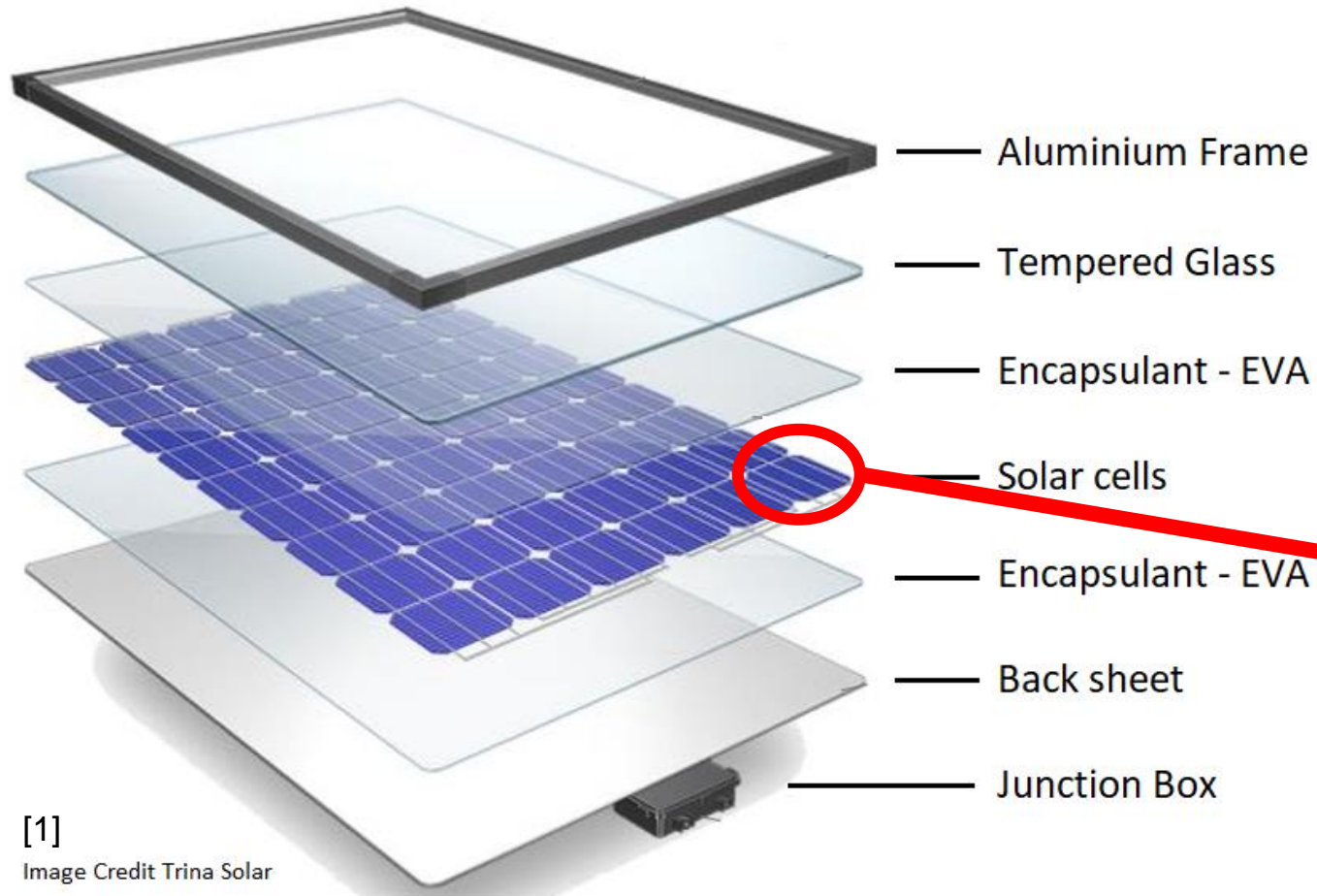
[1] Svarc, J. Solar Panel Construction. Clean Energy Review. 2020. Online:  
<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction> (6. Juni 2024)

# Wo wird Silber im PV-Module eingesetzt?

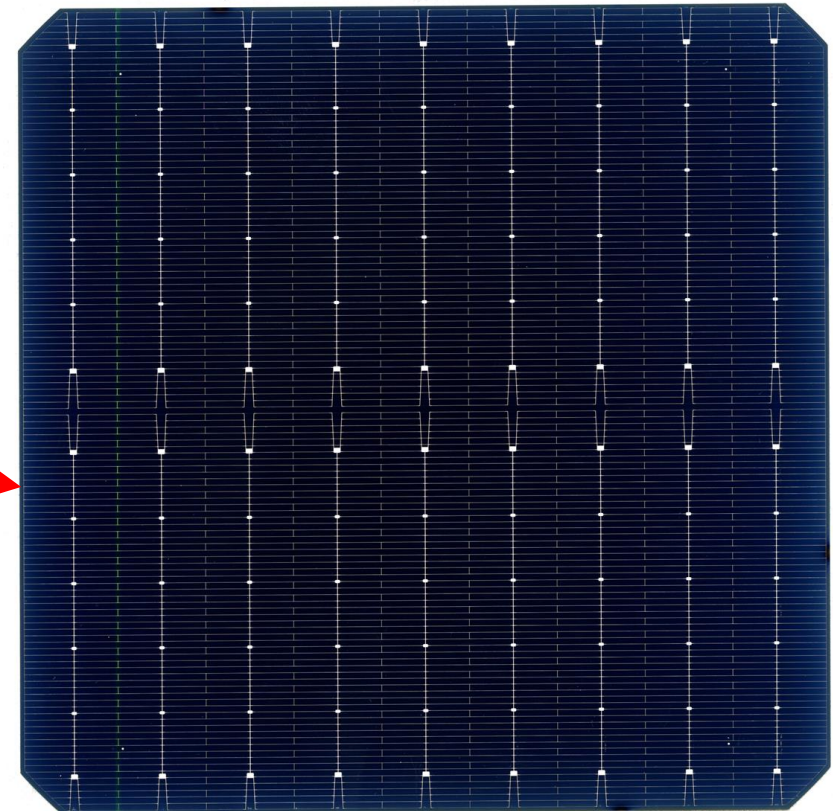


[1] Svarc, J. Solar Panel Construction. Clean Energy Review. 2020. Online: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction> (6. Juni 2024)

# Wo wird Silber im PV-Module eingesetzt?



Vorderseite einer PERC+ Zelle



[1]

Image Credit Trina Solar

[1] Svarc, J. Solar Panel Construction. Clean Energy Review. 2020. Online: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction> (6. Juni 2024)

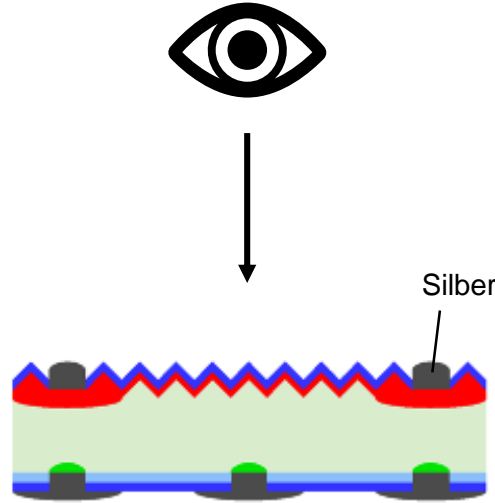


# Metallisierung von PERC+ Zellen

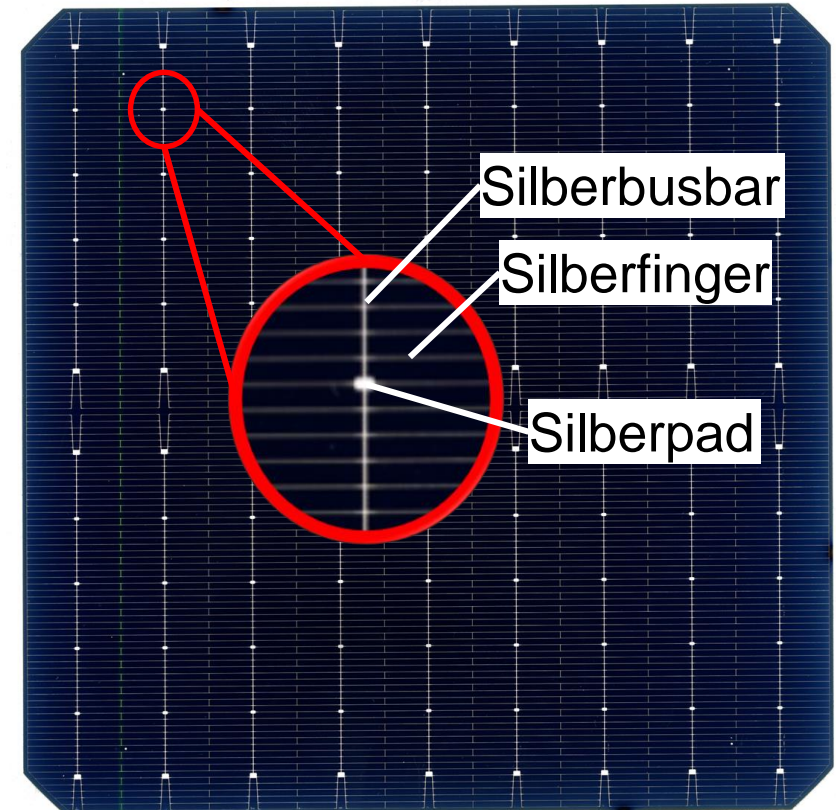
- Zur Metallisierung der Solarzellen mittels Siebdruck werden Metallpasten eingesetzt

## Vorderseiten:

- Silberpaste



Vorderseite einer PERC+ Zelle



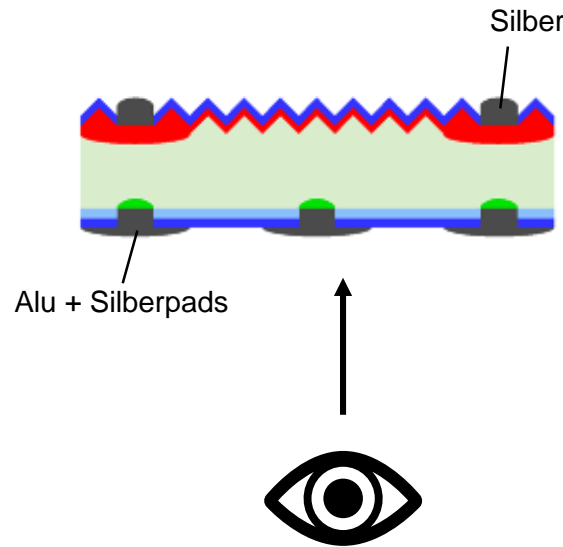
- Zur Metallisierung der Solarzellen mittels Siebdruck werden Metallpasten eingesetzt

## Vorderseiten:

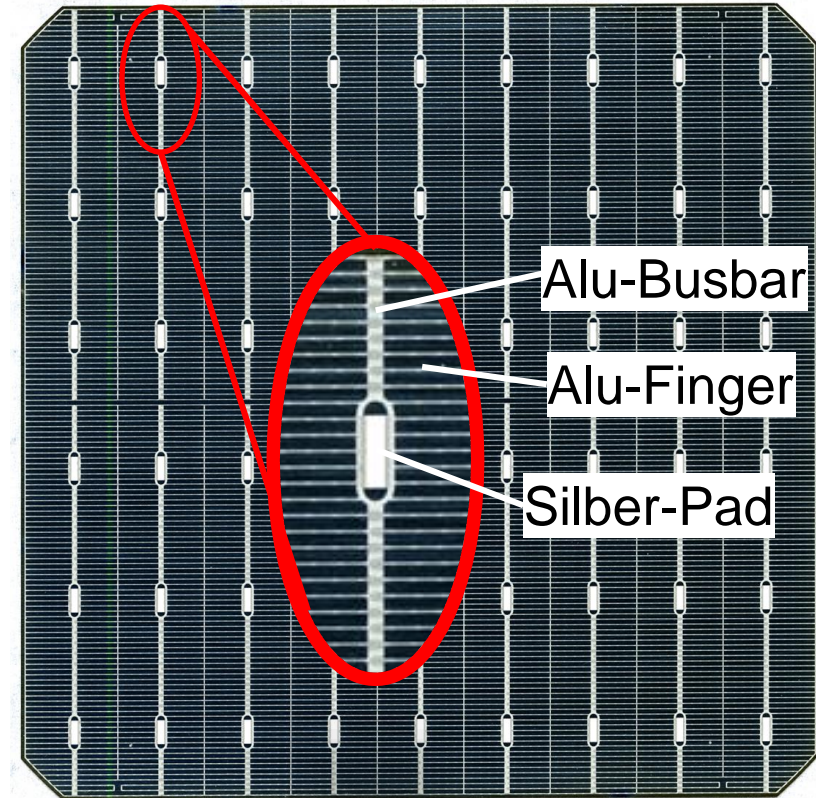
- Silberpaste

## Rückseite:

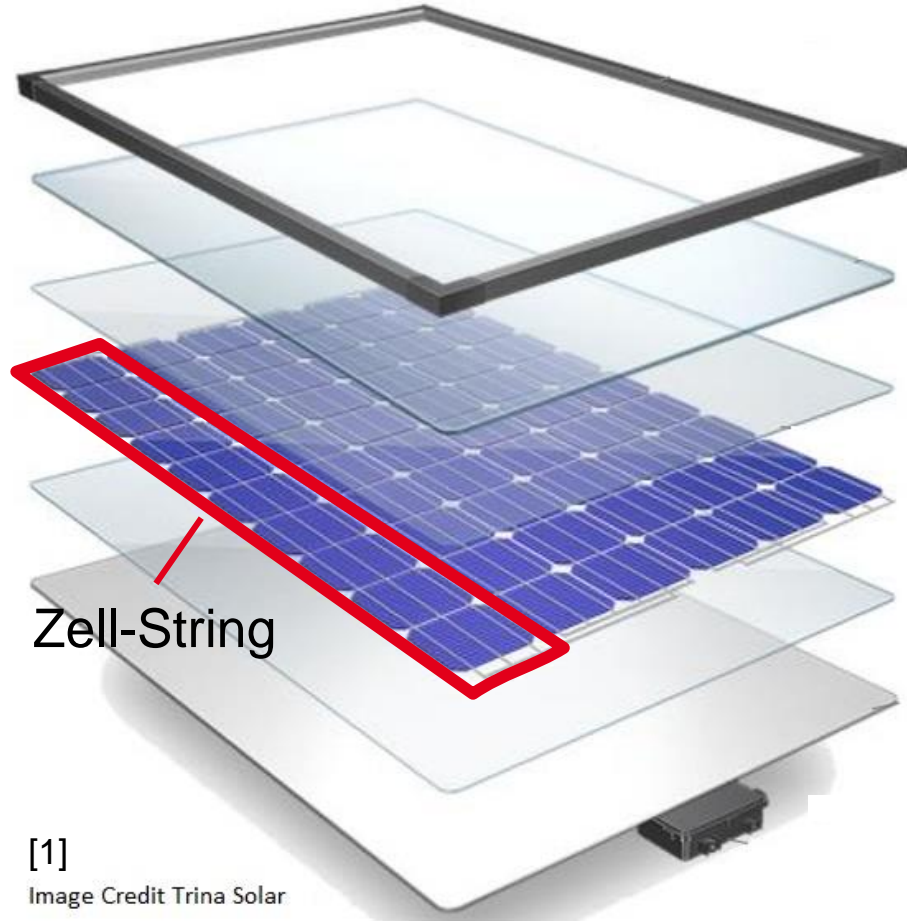
- Alu-Paste: Alu sorgt auf p-typ Zellen durch eine vorteilhafte Wechselwirkung für gute Kontakte
- + lokale Silberpads für das verlöten zu "Stings"



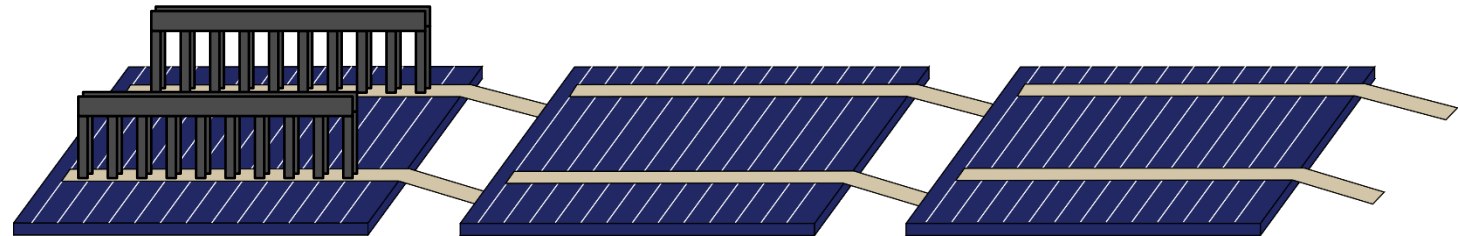
Rückseite einer PERC+ Zelle



# Verschalten der Zellen zu "Strings"

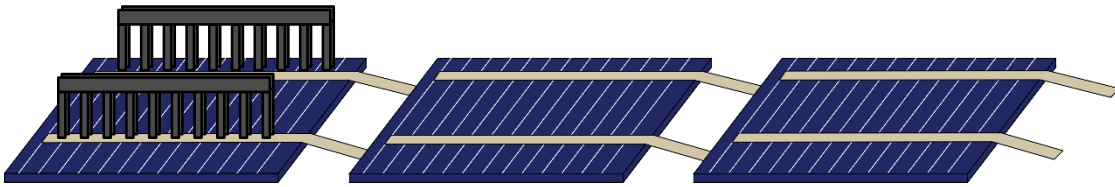


- Verschaltung der einzelnen Solarzellen mit Lot-ummantelten Kupferflachbändern/Drähten
- Üblicherweise durch Kontaktlöten ( $\sim 250^{\circ}\text{C}$ )
- Lokale Silbermetallisierung an den Lötstellen für stabile Kontakte nötig



[1] Svarc, J. Solar Panel Construction. Clean Energy Review. 2020. Online: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction> (6. Juni 2024)

# Was sind die Vorteile von Silber?



- 3-7 mal größere Leitfähigkeit von Silberpasten im Vergleich zu Aluminium oder Kupfer [1,2,3,4]
- Silber ermöglicht damit sehr dünne Strukturen was die Abschattung klein hält
- Keine negative Wechselwirkung mit dem Silizium der Zellen
- Silberpasten lassen sich im Gegensatz zu Alu oder Kupfer sehr gut mit Standardprozessen zu stabilen Kontakten verlöten

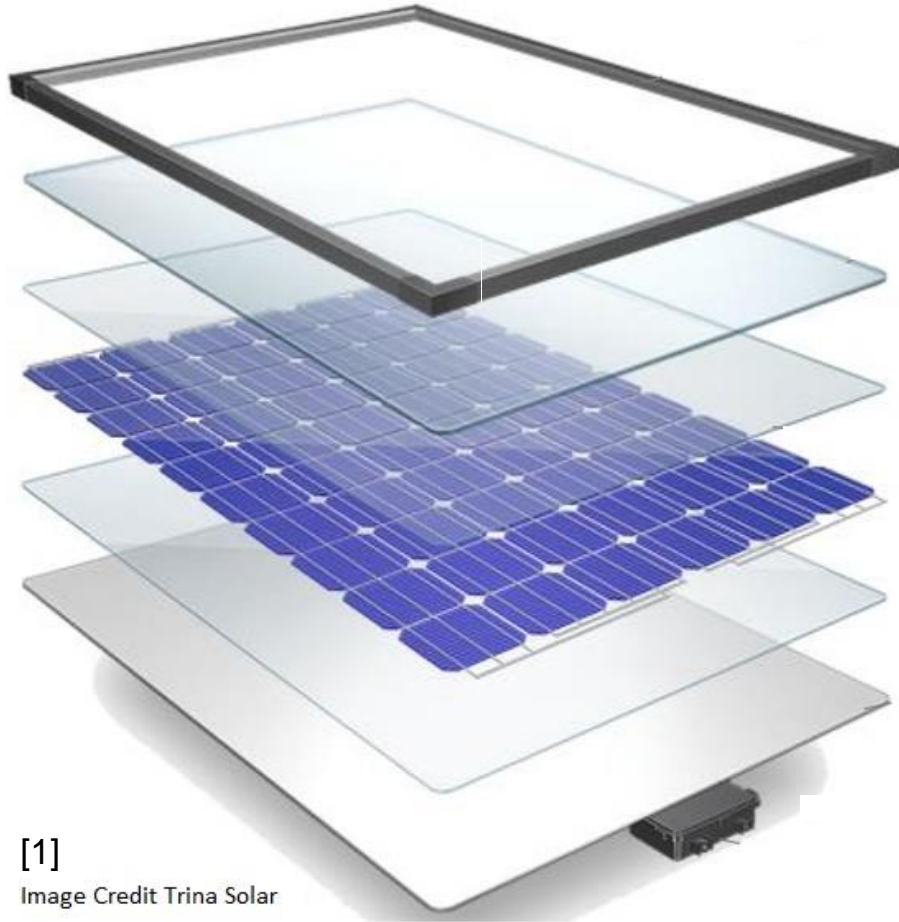
[1] S. Rommel, et al. , Proc. 26th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.,2011, 1538–1541.

2 P. Papet, et al., 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 2011, pp. 3336–3339.

3 P. Zhu et al., Materials, 2021, 14, 765.

4 D. Wood et al. Energy Procedia, 2014, 55, 724–732.





[1]

Image Credit Trina Solar

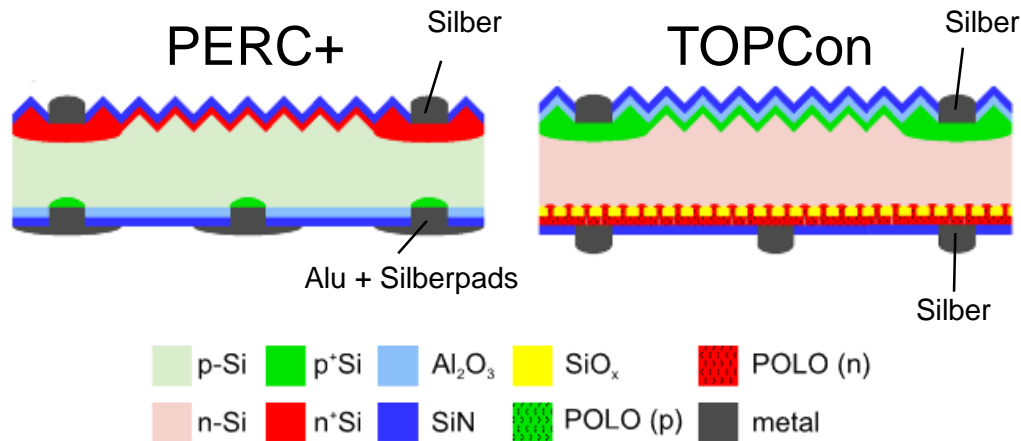
- 6,5 g Silber pro PERC-Modul  
(bei jetzigem Verbrauch von 15,4 mg/W<sup>[2]</sup> )

[1] Svarc, J. Solar Panel Construction. Clean Energy Review. 2020. Online:

<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction> (6. Juni 2024)

[2] Y. Zhang, M. Kim, L. Wang, P. Verlinden, and B. Hallam, *Energy & Environmental Science*, vol. 14, no. 11, pp. 5587–5610, 2021-09-27

# TOPCon: Die nächste Mainstream Technologie

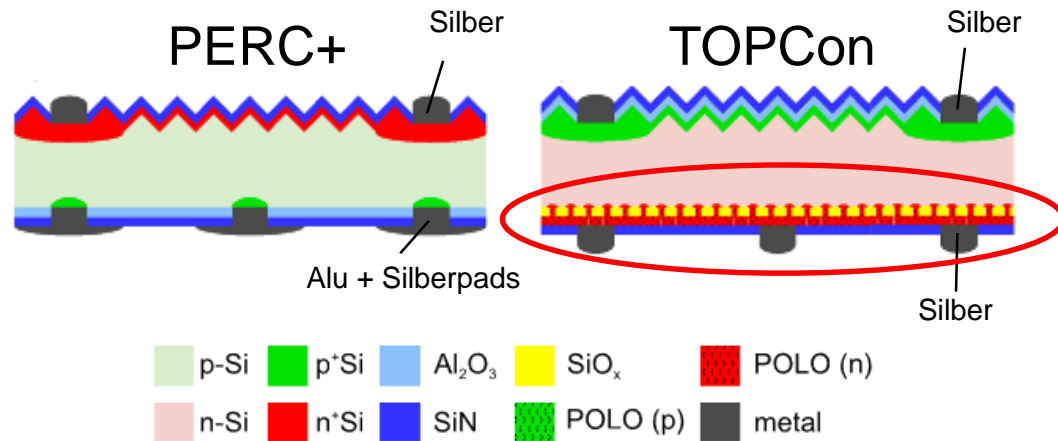


- 2024 werden TOPCon-Solarzellen bereits knapp 50 % Marktanteil erreichen<sup>[1]</sup>

[1] International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV) 15th edition

[2] Y. Zhang, M. Kim, L. Wang, P. Verlinden, and B. Hallam, *Energy & Environmental Science*, vol. 14, no. 11, pp. 5587–5610, 2021-09-27

# TOPCon: Die nächste Mainstream Technologie

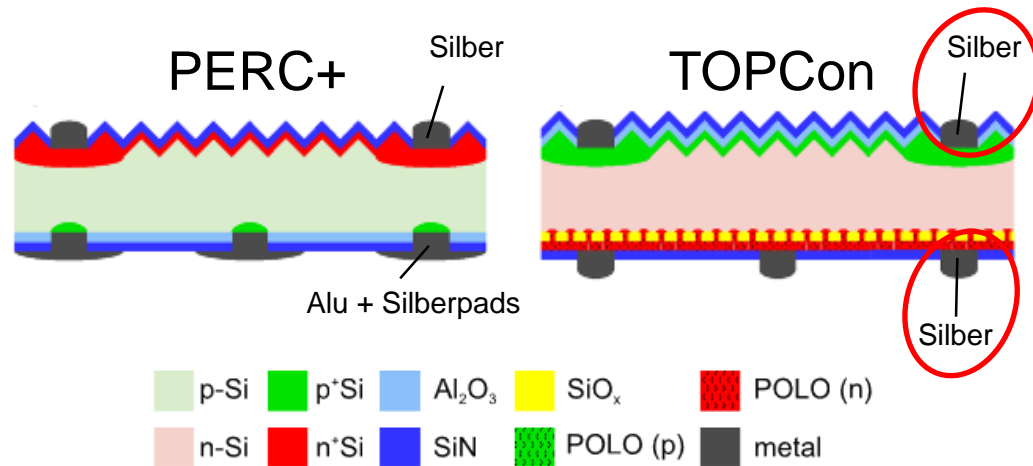


- 2024 werden TOPCon-Solarzellen bereits knapp 50 % Marktanteil erreichen<sup>[1]</sup>
- TOPCon-Module erreichen im Mittel aktuell ca. 5% und in 2034 bis zu 10% höhere Effizienzen als PERC-Module<sup>[1]</sup>

[1] International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV) 15th edition

[2] Y. Zhang, M. Kim, L. Wang, P. Verlinden, and B. Hallam, *Energy & Environmental Science*, vol. 14, no. 11, pp. 5587–5610, 2021-09-27

# TOPCon: Die nächste Mainstream Technologie



- 2024 werden TOPCon-Solarzellen bereits knapp 50 % Marktanteil erreichen<sup>[1]</sup>
- TOPCon-Module erreichen im Mittel aktuell ca. 5% und in 2034 bis zu 10% höhere Effizienzen als PERC<sup>[1]</sup>
- Benötigt ca. 65% mehr Silber, da sowohl Vorder- als auch Rückseitenkontakte Silberpasten benötigen<sup>[2]</sup>

~ 11 g Silber pro TOPCon-Modul

[1] International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV) 15th edition

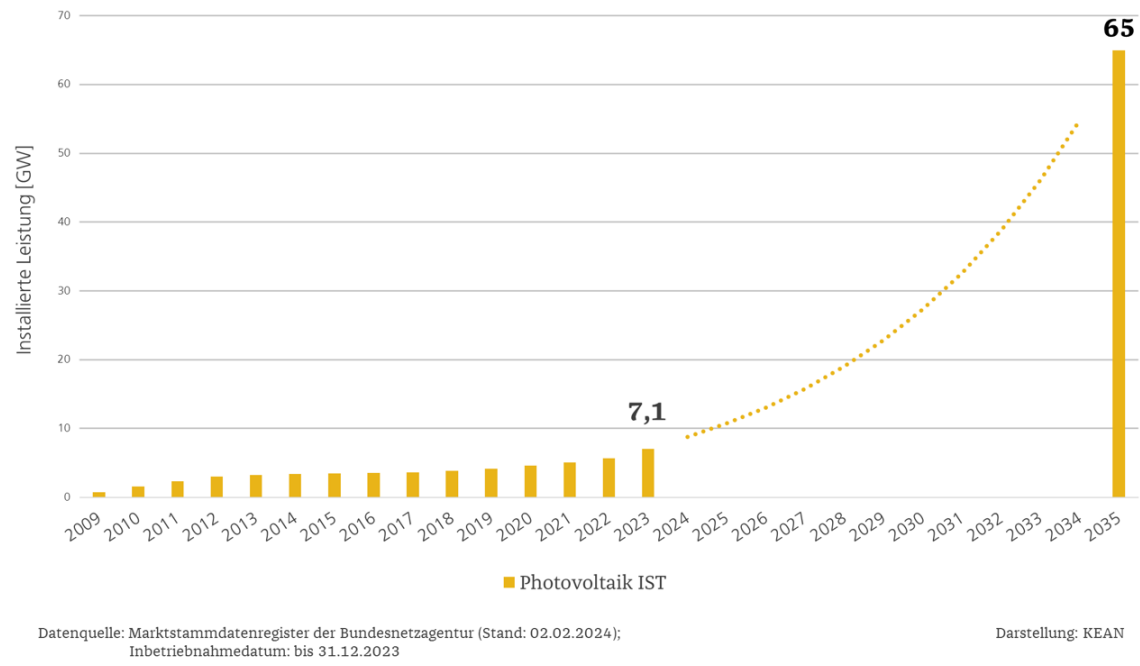
[2] Y. Zhang, M. Kim, L. Wang, P. Verlinden, and B. Hallam, *Energy & Environmental Science*, vol. 14, no. 11, pp. 5587–5610, 2021-09-27



# Entwicklung in der PV-Industrie in Niedersachsen

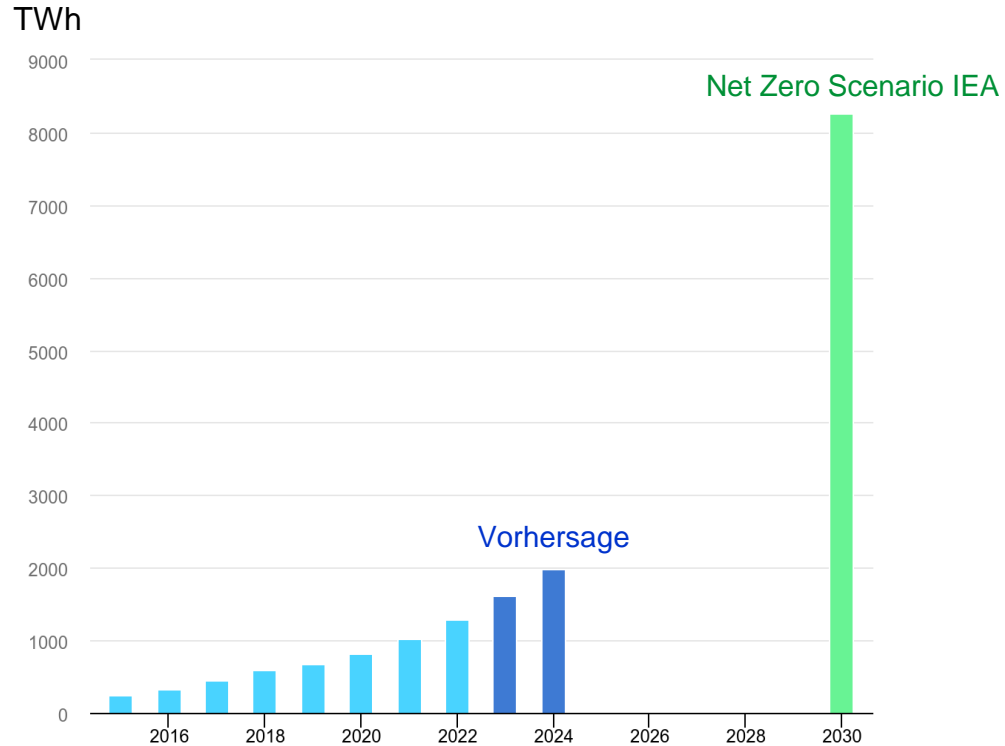


Installierte Leistung Photovoltaik in Niedersachsen  
mit Ausbauziel 65 GW in 2035



- In den letzten Jahren hat die Photovoltaik ein exponentielles Wachstum verzeichnet
- Auch in Niedersachsen war 2023 ein Rekordjahr
- Niedersächsisches Ausbauziel von 65 GW in 2035 → Wachstum von im Mittel 18% nötig

## PV-Stromerzeugung



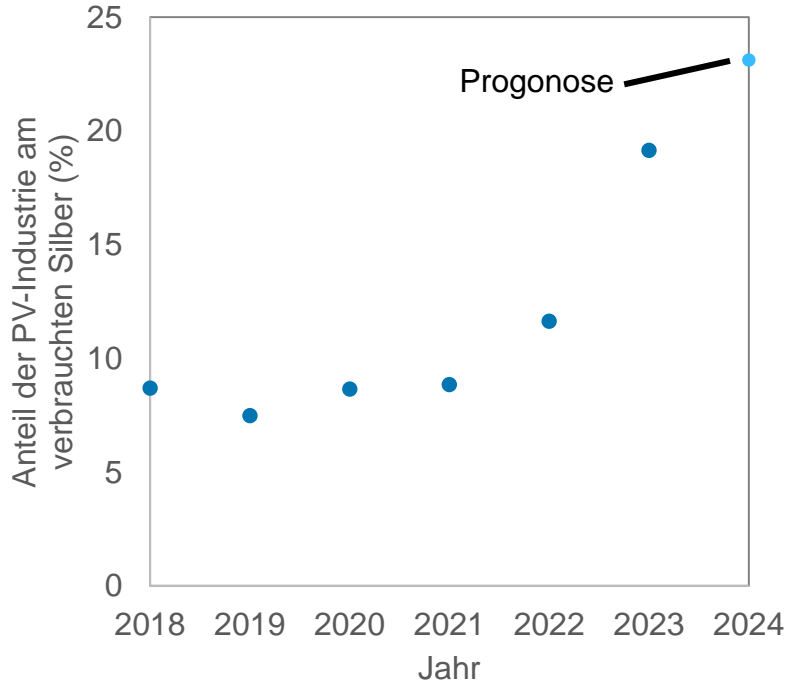
[1]

- Insgesamt noch weit entfernt vom Ziel die erneuerbaren Energien bis 2030 zu verdreifachen<sup>[2]</sup>
- Um das Zwischenziel vom „Net Zero Scenario IEA“ zu erreichen ist ein weiteres Wachstum von im Mittel 27% nötig <sup>[2, 3]</sup>

[1] IEA (2023), Solar PV power generation in the Net Zero Scenario, 2015-2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-power-generation-in-the-net-zero-scenario-2015-2030>, Licence: CC BY 4.0

[2] IEA (2023), Tracking Clean Energy Progress 2023, IEA, Paris

[3] IRENA (2024), Renewable capacity statistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.



- weltweite Reserven an Silber (Ag) werden auf 560 000 Tonnen geschätzt <sup>[1]</sup>, jährliches Angebot 28 000 – 30 000 Tonnen <sup>[1,2]</sup>
- Anstieg des Bedarfs in vielen Branchen, z.B. Elektromobilität<sup>[3,4]</sup>
- Nachfrage in der PV-Industrie steigt in 2024 voraussichtlich auf über 20% der gesamten Angebotes<sup>[5]</sup>

[1] The Silver Institute, World Silver Survey 2019, 2020

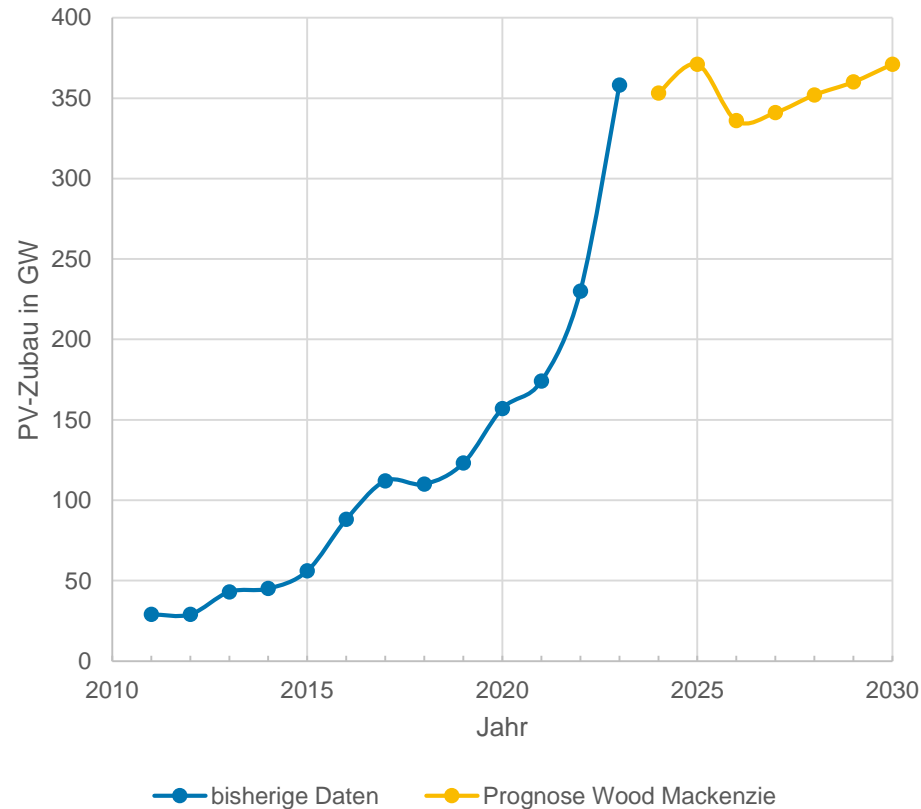
[2] CRC Handbook of Chemistry and Physics, ed. W. M. Haynes, CRC Press, 95th edn, 2014.

[3] CRU International, The Role of Silver in the Green Revolution, 2018.

[4] The Silver Institute, Market Trend Report - Silver's Growing Role in the Automotive Industry, 2021

[5] The Silver Institute, Silver Supply & Demand, <https://www.silverinstitute.org/silver-supply-demand/>, (accessed 1 Juni 2024).

# Prognose für die PV-Industrie



Mögliche Produktionskapazität bei einem Silberverbrauch von 20 % des jährlichen Angebotes<sup>[1]</sup>

	Aktueller Silberverbrauch <sup>[2]</sup>
PERC+	377 GW
TOPCon	277 GW

- Silberverbrauch muss drastisch reduziert werden
- Sonst wird Silber ein limitierender Faktor für das Wachstum der PV-Industrie

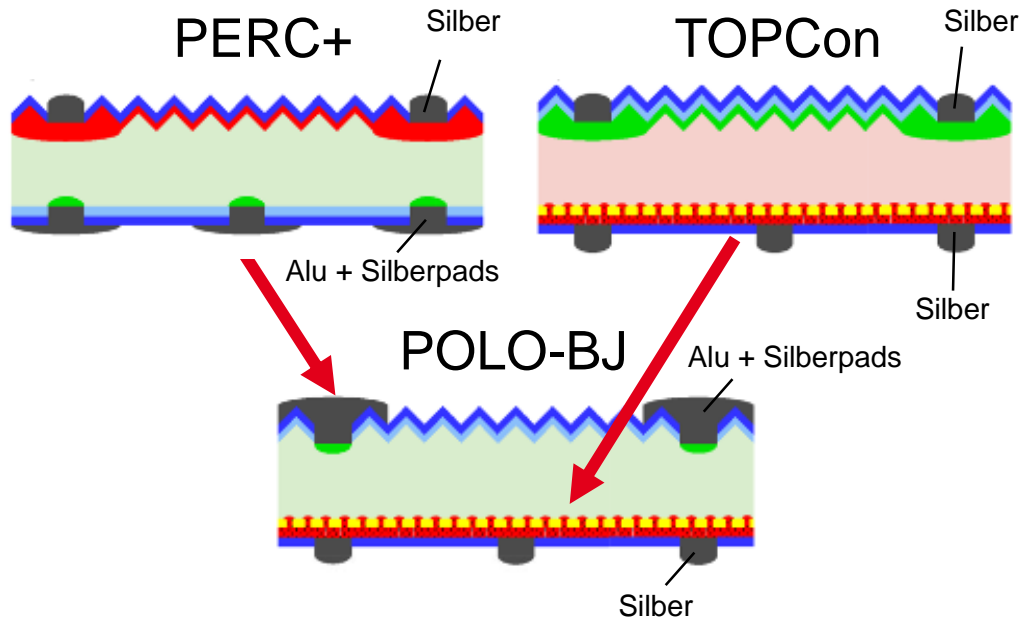
[1] Zahlen aus pv magazine „ Wood Mackenzie: Photovoltaik-Wachstum wird global bis 2032 abflachen“ 29.01.2024

[2] Y. Zhang, M. Kim, L. Wang, P. Verlinden, and B. Hallam, *Energy & Environmental Science*, vol. 14, no. 11, pp. 5587–5610, 2021-09-27

[3] ITRPV, International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), 2020 Results, 2021.

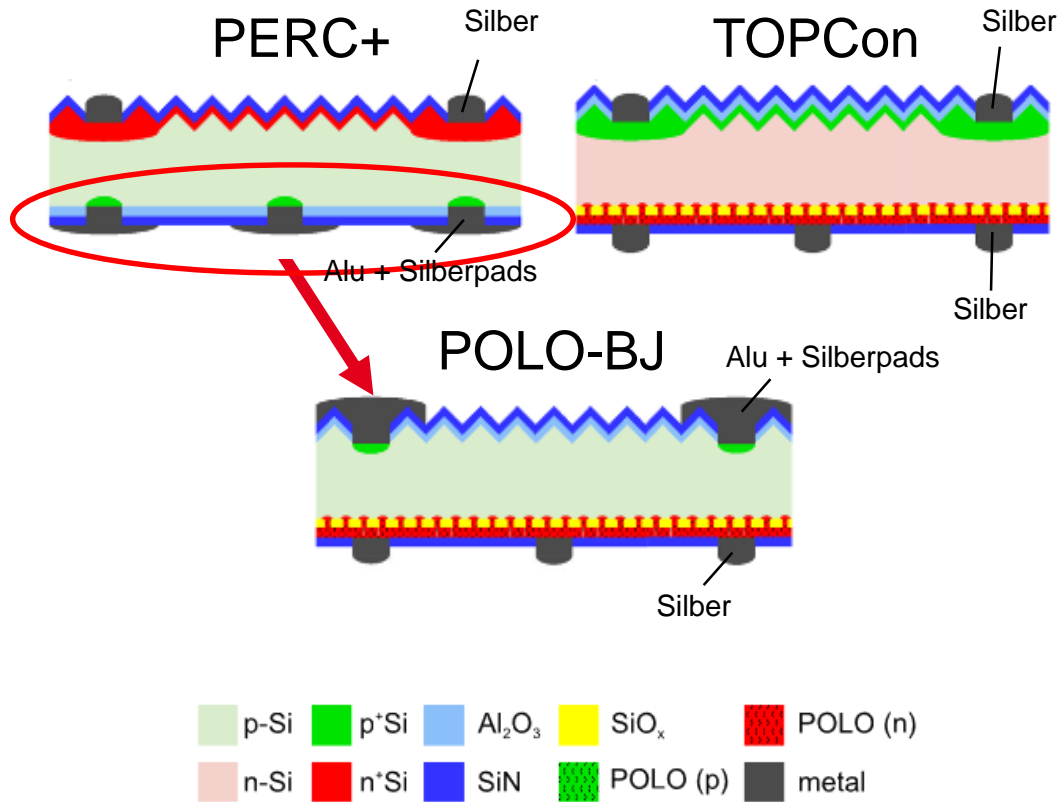


# POLO-BJ Zellen – Das beste aus beiden Welten



[1] B Min et al., "24.2%-Efficient POLO Back Junction Solar Cell with Industrial PECVD AlO<sub>x</sub>/SiN<sub>y</sub> Passivation" Proceedings of the 40th EUPVSEC, Portugal, 2023

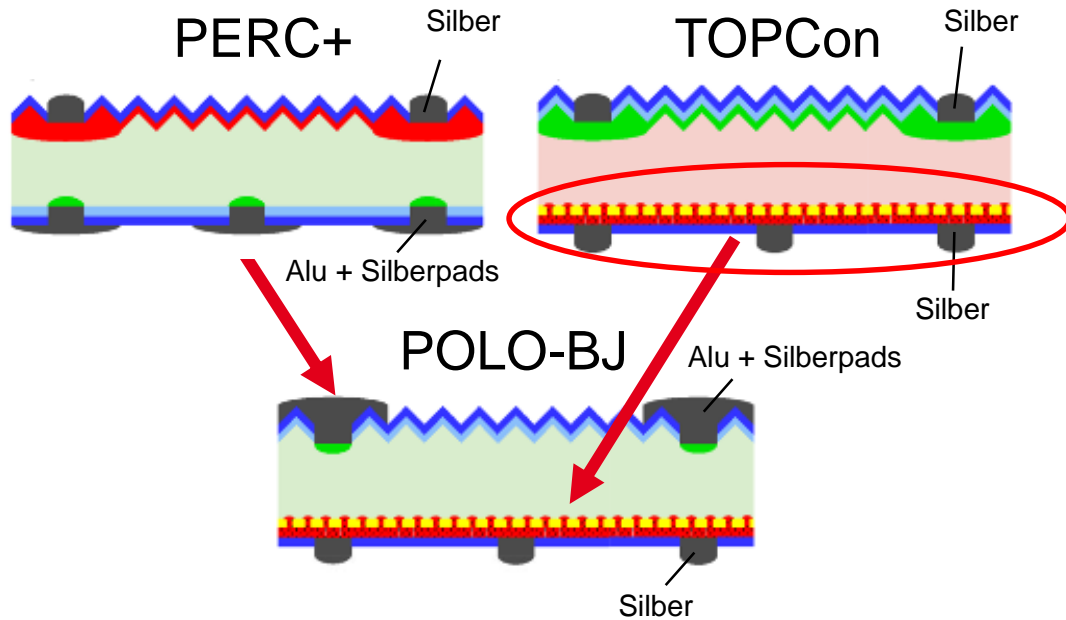
# POLO-BJ Zellen – Das beste aus beiden Welten



- Vorderseite: PERC+ Zellen erprobte und damit bereits industriell optimierte Alu Kontakte

[1] B Min et al., "24.2%-Efficient POLO Back Junction Solar Cell with Industrial PECVD AlO<sub>x</sub>/SiN<sub>y</sub> Passivation" Proceedings of the 40th EUPVSEC, Portugal, 2023

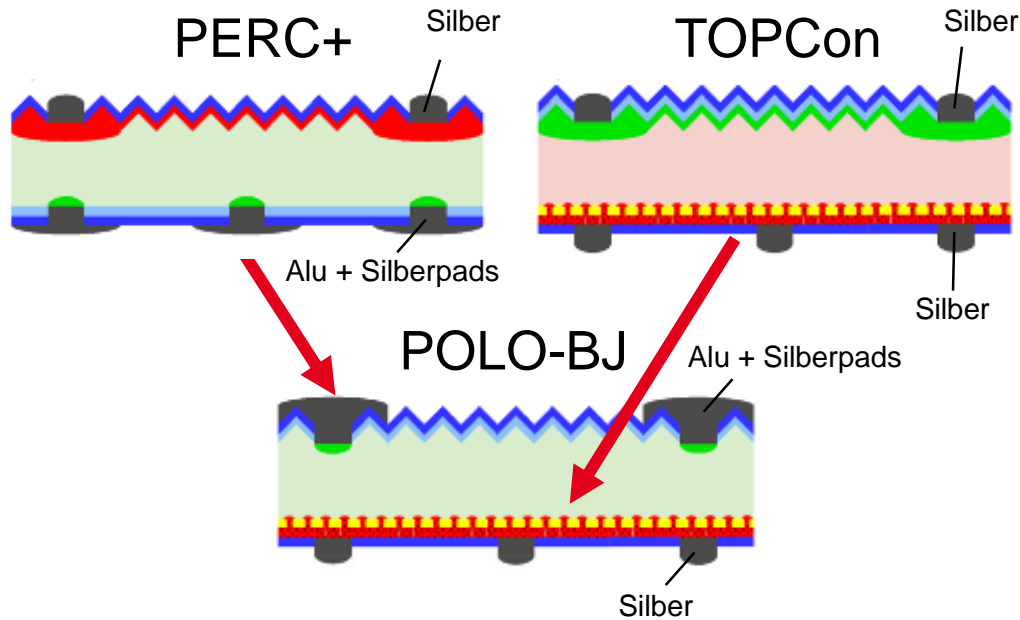
# POLO-BJ Zellen – Das beste aus beiden Welten



- Vorderseite: PERC+ Zellen erprobte und damit bereits industriell optimierte Alu Kontakte
- Rückseite: Passivierende Poly-Si (POLO) Kontakte, wie auch in TOPCon Zellen

[1] B Min et al., "24.2%-Efficient POLO Back Junction Solar Cell with Industrial PECVD AlOx/SiNy Passivation" Proceedings of the 40th EUPVSEC, Portugal, 2023

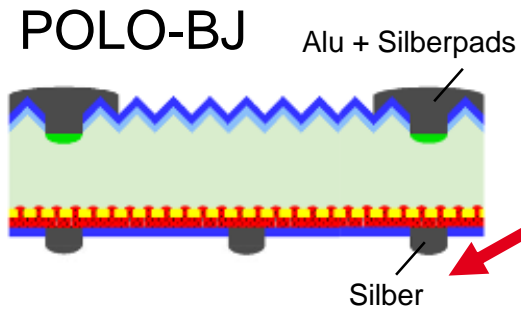
# POLO-BJ Zellen – Das beste aus beiden Welten



- Vorderseite: PERC+ Zellen erprobte und damit bereits industriell optimierte Alu Kontakte
- Rückseite: Passivierende Poly-Si (POLO) Kontakte, wie auch in TOPCon Zellen
- Hohes Effizienzpotential trotz niedriger Komplexität
- Beste Zelle bisher mit Effizienz von 24.2 %<sup>[1]</sup>
- Silberverbrauch auf PERC+ Niveau  
→ ~ 40 % weniger Silber als TOPCon

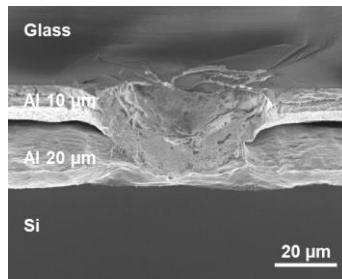
[1] B Min et al., "24.2%-Efficient POLO Back Junction Solar Cell with Industrial PECVD AlOx/SiNy Passivation" Proceedings of the 40th EUPVSEC, Portugal, 2023





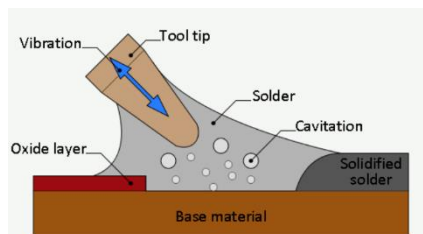
## Zellmetallisierung:

- Silberfreie Rückseite: Kontaktierung mit **Alu-Paste**<sup>[1]</sup>  
→ durchdringen des Alu bis zum c-Si verhindert  
→ niedrigen Kontaktwiderstand erreicht



## Zellverschaltung:

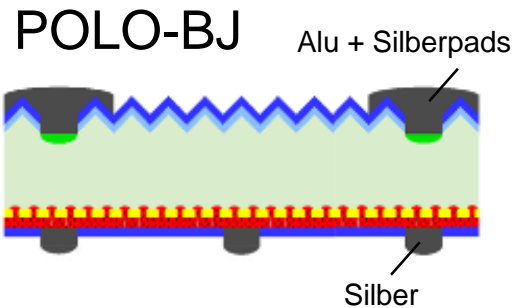
- Laserschweißen
- Ultraschallöten



[1] B.Min et al., „All-Aluminum Screen-Printed POLO Back Junction Solar Cells”, Proceedings of the 40th EUPVSEC 2023

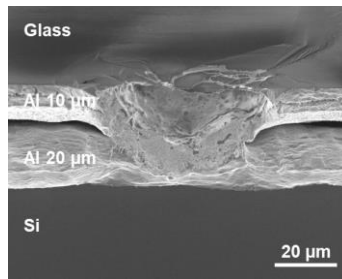
[2] M. Köntges et al., Nature Conservation and Nuclear Safety, FKZ: 0329717C, 2005

[3] H Schulte-Huxel et al., „Interconnection of busbar-free back contacted solar cells by laser welding” Progress in Photovoltaic 2015



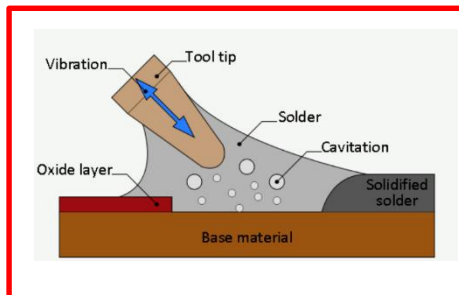
## Zellmetallisierung:

- Silberfreie Rückseite: Kontaktierung mit **Alu-Paste**<sup>[1]</sup>
  - durchdringen des Alu bis zum c-Si verhindern
  - niedrigen Kontaktwiderstand erreichen



## Zellverschaltung:

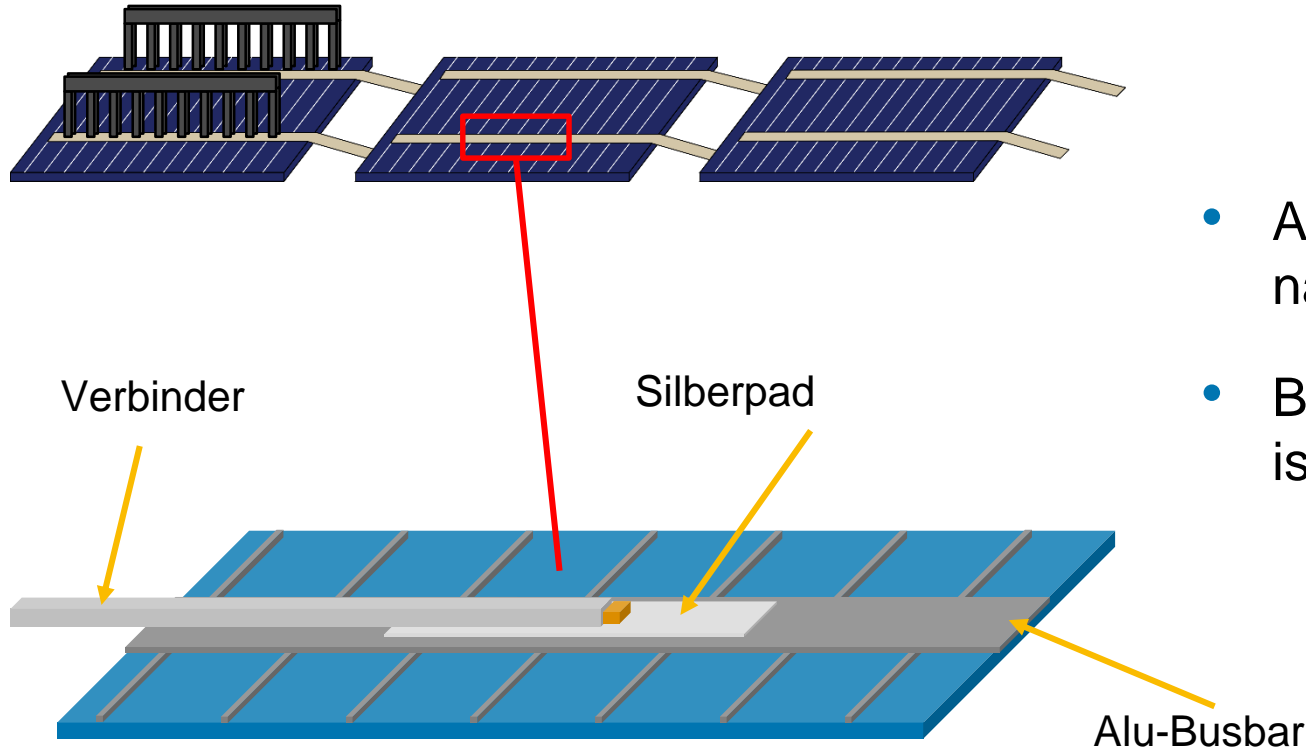
- Laserschweißen
- **Ultraschallöten**



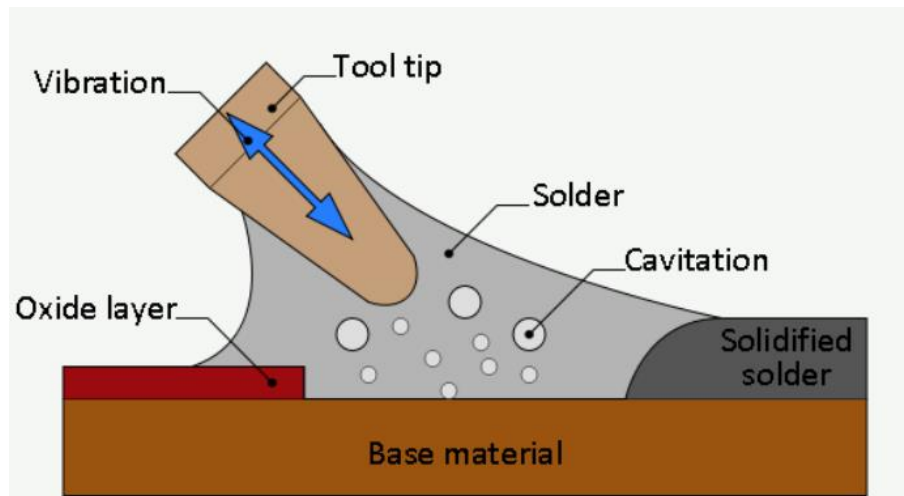
[1] B.Min et al., „All-Aluminum Screen-Printed POLO Back Junction Solar Cells”, Proceedings of the 40th EUPVSEC 2023

[2] M. Köntges et al., Nature Conservation and Nuclear Safety, FKZ: 0329717C, 2005

[3] H Schulte-Huxel et al., „Interconnection of busbar-free back contacted solar cells by laser welding” Progress in Photovoltaic 2015



- Aluminium bildet an Luft ein hochstabiles natives Oxid auf der Oberfläche
- Bei Standardlötverfahren kann das Lot das isolierende Oxid nicht durchringen

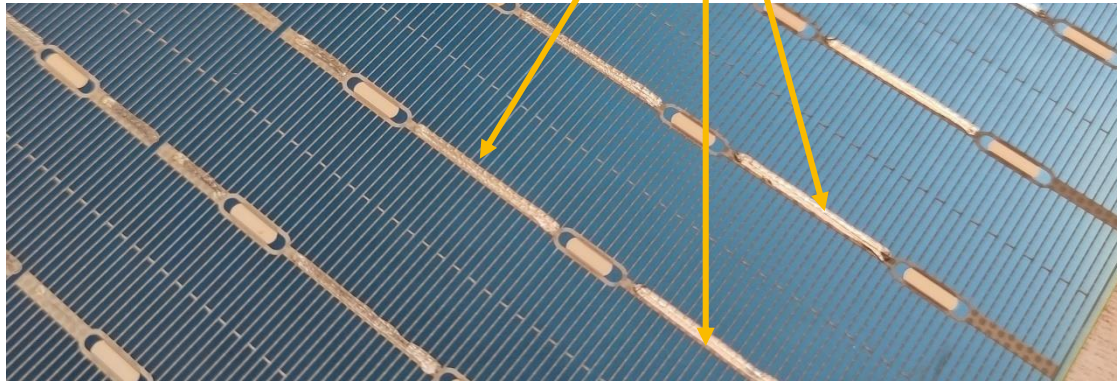


<https://www.u-bonder.com/how-ultrasonic-soldering-works/>

- Lötspitze vibriert mit kHz-Frequenz
- Vibration der Spitze im geschmolzenen Lot erzeugt kleine Blasen
- Bombardierung und Implosion der Blasen führt zum Aufbrechen der Oxidschicht
- Zinn-Zink-Lot kann Kontakt zu Al herstellen

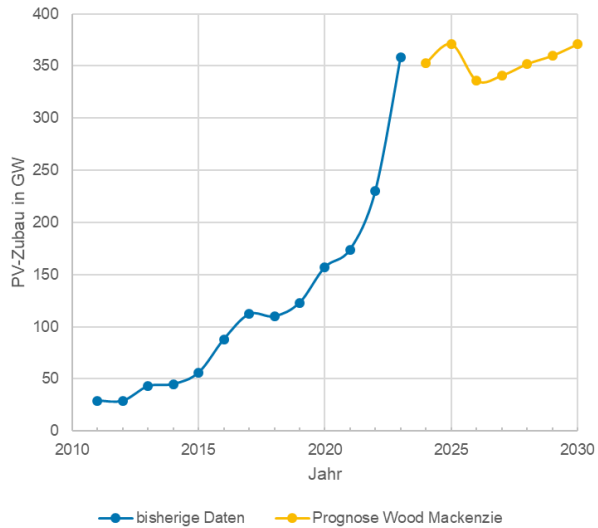


Ultraschall gelötete Zinnpads



- ✓ Ultraschalllöten auf Al-Busbar ist ohne Schädigung der Zelle möglich
- ✓ Niedriger Kontaktwiderstand
- ✓ Zuverlässige mechanische Haftung
- ✓ Sehr gute Stabilität in beschleunigten Alterungstests

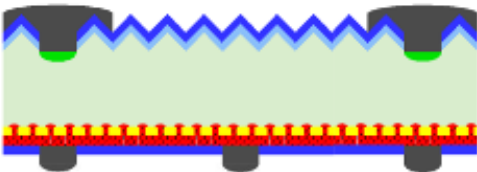
Vielversprechende Technologie zum Verschaltung von silberfreien Zellen



- weiterhin zusätzliche weltweite Zubau-Steigerung von 27%/Jahr nötig
- Schon 2024 benötigt die PV-Industrie > 20% des Silberangebotes
- Silberverbrauch könnte den Zubau in den nächsten Jahren limitieren  
→ drastische Reduzierung des Silberverbrauchs notwendig

## POLO-BJ :

### POLO-BJ



- Inhärent - 40% Silber im Vergleich zu TOPCon
- Hohes Effizienzpotential (24.2 % erreicht)
- Ultraschallöten und Laserschweißen ermöglichen die Verschaltung silberfreier Zellen zu Modulen

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Projektförderung durch



Supported by:



on the basis of a decision  
by the German Bundestag