

A photograph of a modern, curved building with a glass facade, likely a Fraunhofer research facility. The building is surrounded by green trees and a lawn. In the foreground, there are three tall flagpoles with white flags bearing the Fraunhofer logo. A small sign with the Fraunhofer logo is also visible on the lawn. The sky is blue with some clouds.

# Entwicklungslinien Photovoltaik

---

**Anlass: 25 Jahre EEG, 27. Würzburger Gespräche zum Umweltenergierecht,  
Umweltforum Berlin, Pufendorfstraße 11**

**Referent: Prof. Andreas Bett**

**2. April 2025**

**[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)**

# Agenda

## 1 Photovoltaik: Eine Erfolgsgeschichte

## 2 Technologie Entwicklung

## 3 Produktion und Resilienz

## 4 Zusammenfassung



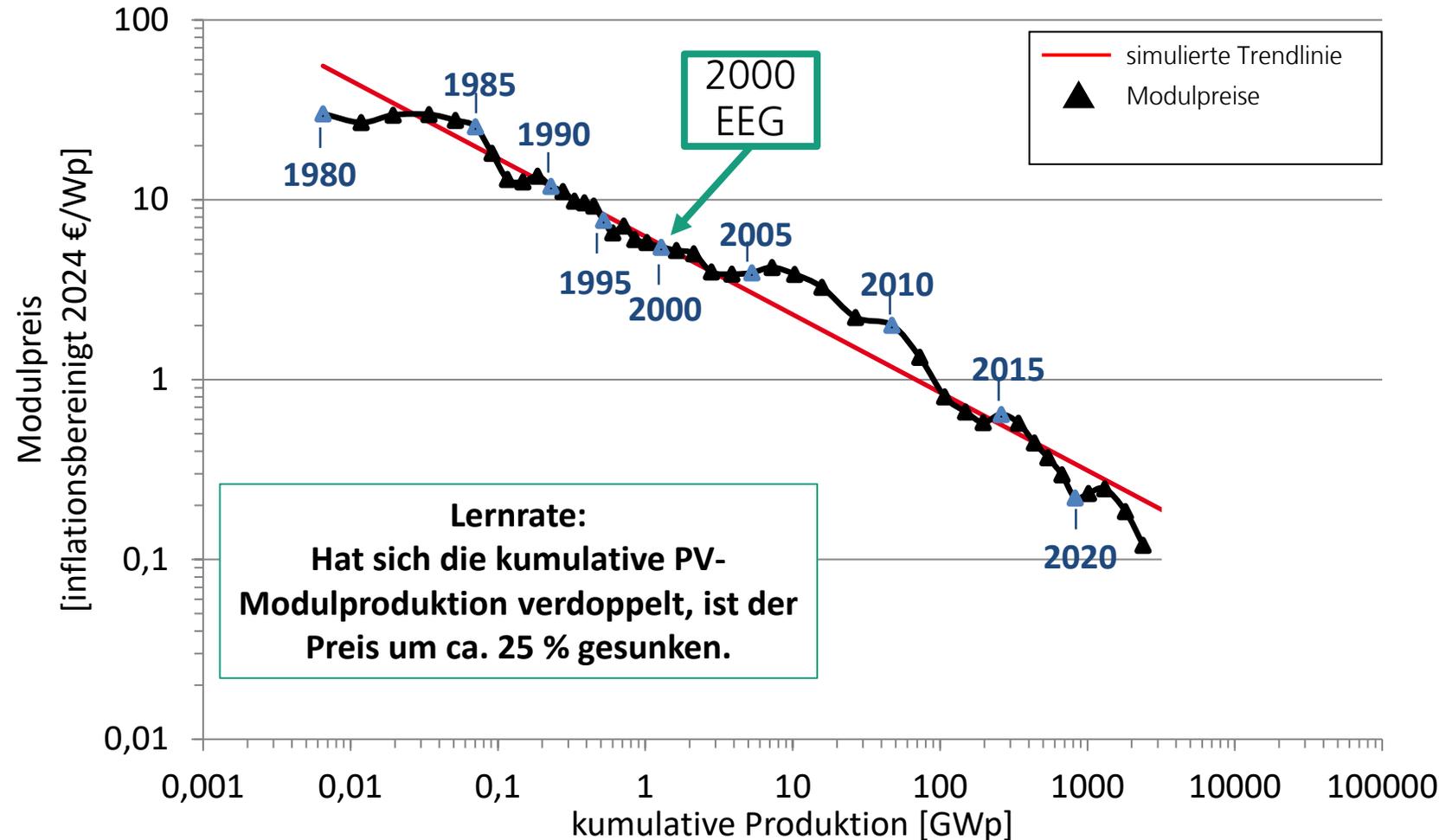
**Die Erfinder der Silizium-Solarzelle  
G. Pearson, D. Chapin und C. Fuller  
1954 in den Bell Laboratories**

# Die Erfolgsgeschichte der Photovoltaik

PV hat heute die niedrigsten Gestehungskosten in €cent/kWh!!!

## Treibende Faktoren der Preisreduktion:

- Verbesserung der Produktionsanlagen (Durchsatz, Ausbeute, Qualität)
- technologische Innovationen (Effizienz, Materialverbrauch, neue Technologien)
- DER Trigger: Geschäftsmodelle! Ermöglicht durch politische Rahmensetzung.

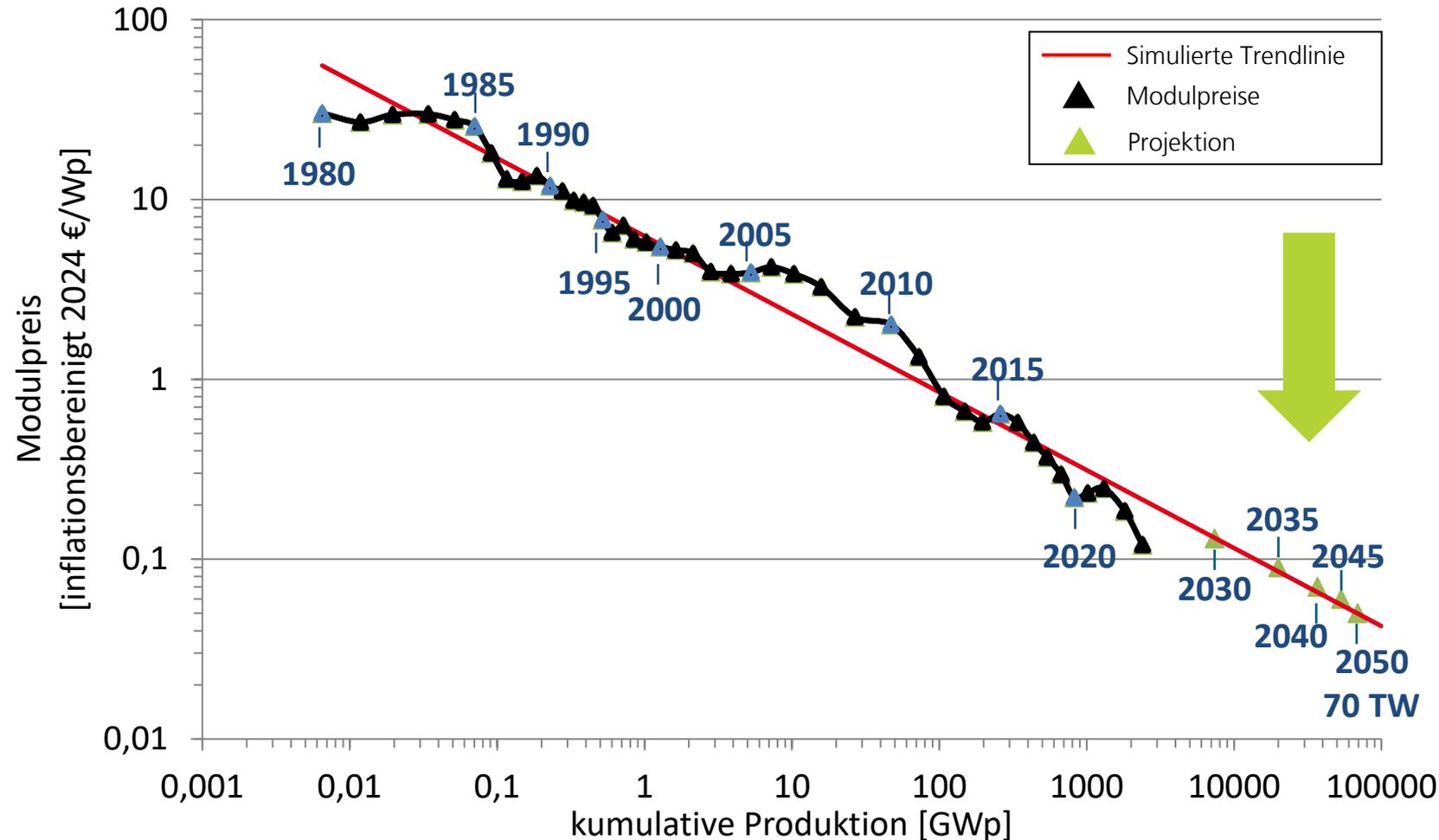


# Die Erfolgsgeschichte der Photovoltaik

PV hat heute die niedrigsten Gestehungskosten in €cent/kWh

## Treibende Faktoren der Preisreduktion:

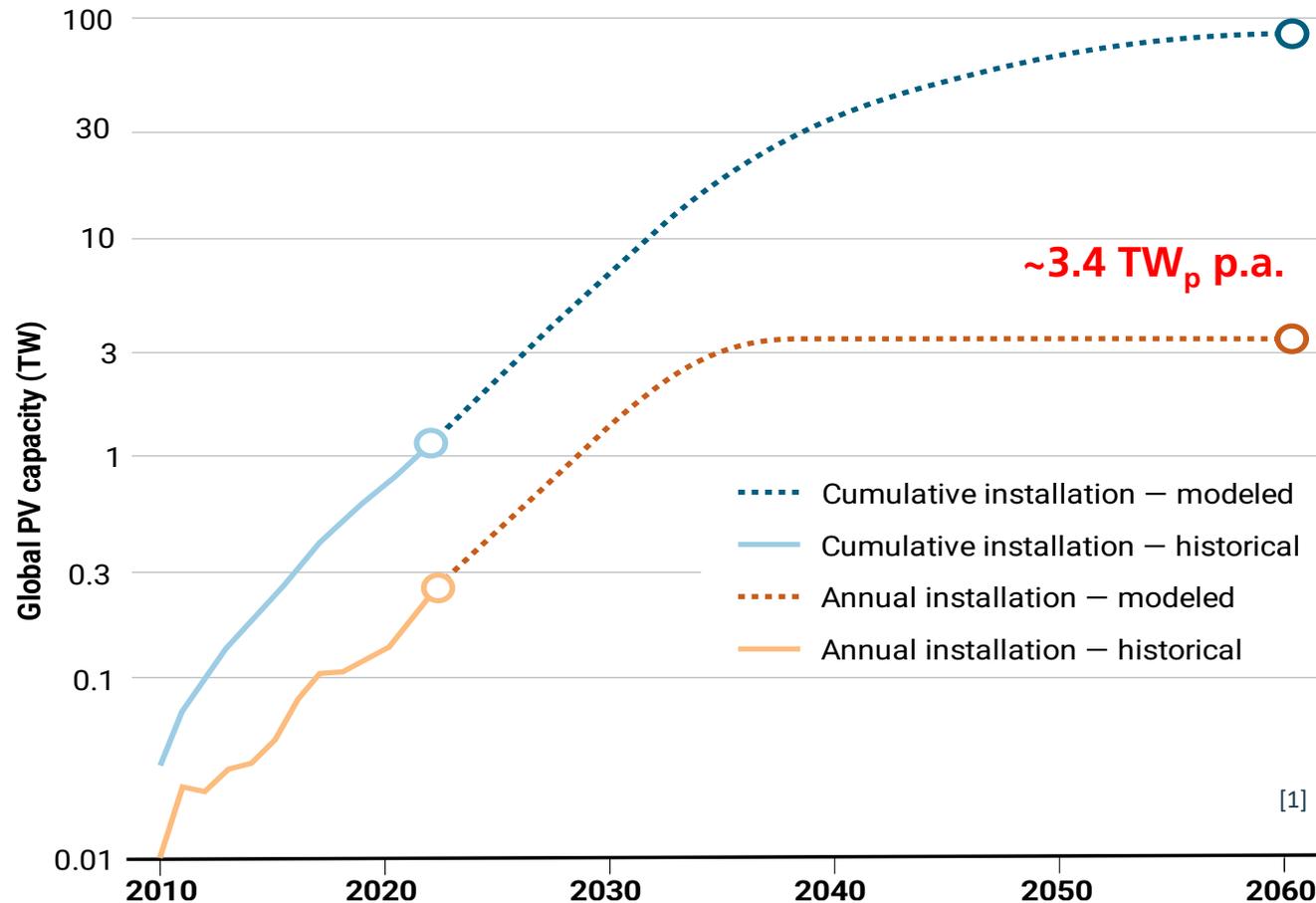
- Verbesserung der Produktionsanlagen (Durchsatz, Ausbeute, Qualität)
- technologische Innovationen (Effizienz, Materialverbrauch, neue Technologien)
- DER Trigger: Geschäftsmodelle! Ermöglicht durch politische Rahmensetzung.
- Wie geht es weiter?



# Noch weitere 10 Jahre: Jährliches Wachstum von mehr als 25%!

~75 TW<sub>p</sub> kum.

~3.4 TW<sub>p</sub> p.a.



[1]

POLICY FORUM

[1]

RENEWABLE ENERGY

## Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option

25% annual PV growth is possible over the next decade

By Nancy M. Haegel, Pierre Verlinden, Marta Victoria, Pietro Altermatt, Harry Atwater, Teresa Barnes, Christian Breyer, Chris Case, Stefaan De Wolf, Chris Deline, Marwan Dhamrin, Bernhard Dimmler, Markus Gloeckler, Jan Christoph Goldschmidt, Brett Hallam, Sophia Haussener, Burkhard Holder, Ulrich Jaeger, Arnulf Jaeger-Waldau, Izumi Kaizuka, Hiroshi Kikusato, Benjamin Kroposki, Sarah Kurtz, Koji Matsubara, Stefan Nowak, Kazuhiko Ogimoto, Christian Peter, Ian Marius Peters, Simon Philipps, Michael Powalla, Uwe Rau, Thomas Reindl, Maria Roumpani, Keiichiro Sakurai, Christian Schorn, Peter Schossig, Rutger Schlatmann, Ron Sinton, Abdelilah Slaoui, Brittany L. Smith, Peter Schneidewind, BJ Stanbery, Marko Topic, William Tumas, Juzer Vasi, Matthias Vetter, Eicke Weber, A. W. Weeber, Anke Weidlich, Dirk Weiss, Andreas W. Bett



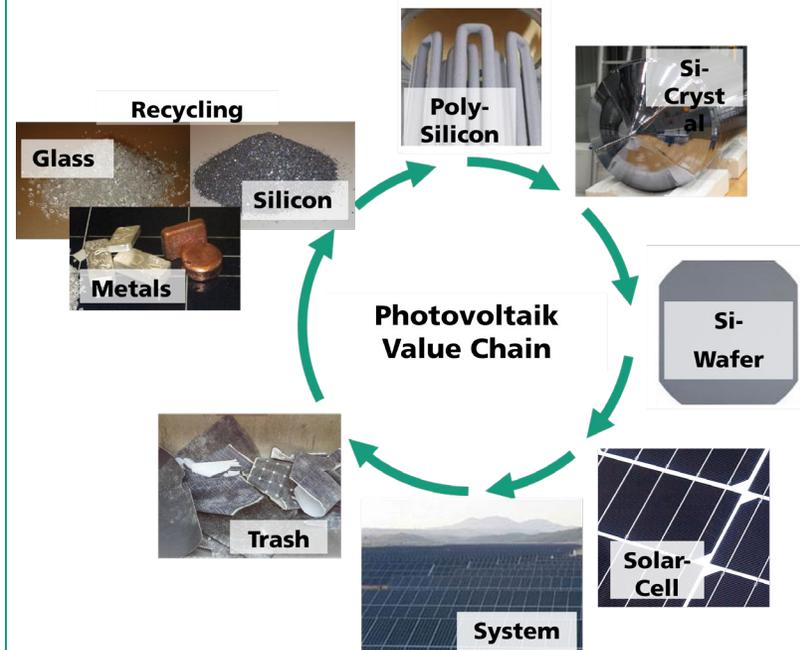
# Notwendiger Photovoltaikausbau

Große Mengen an Ressourcen werden benötigt:

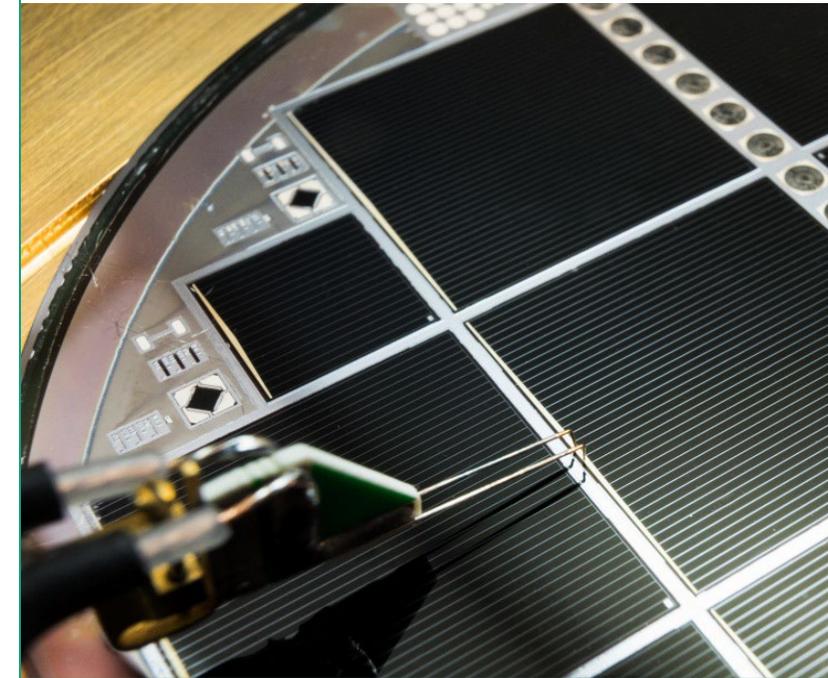
- ~ 300 000 km<sup>2</sup> Fläche
- ~ 3 000 000 000 Tonnen an Materialien: Glas, Silizium, Aluminium, Silber, Polymere ...

Wie kann diesem Verbrauch begegnet werden?

1. Si-Module-Recycling und Zirkularität sind notwendig!



2. Höchste Effizienzen sind essenziell  
→ weniger Material!



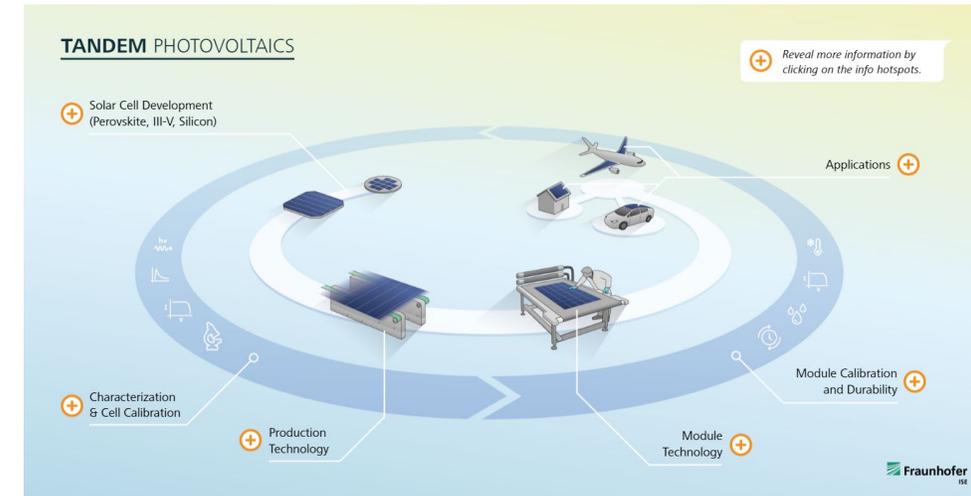
# Agenda

1 Photovoltaik: Eine Erfolgsgeschichte

2 Technologie Entwicklung

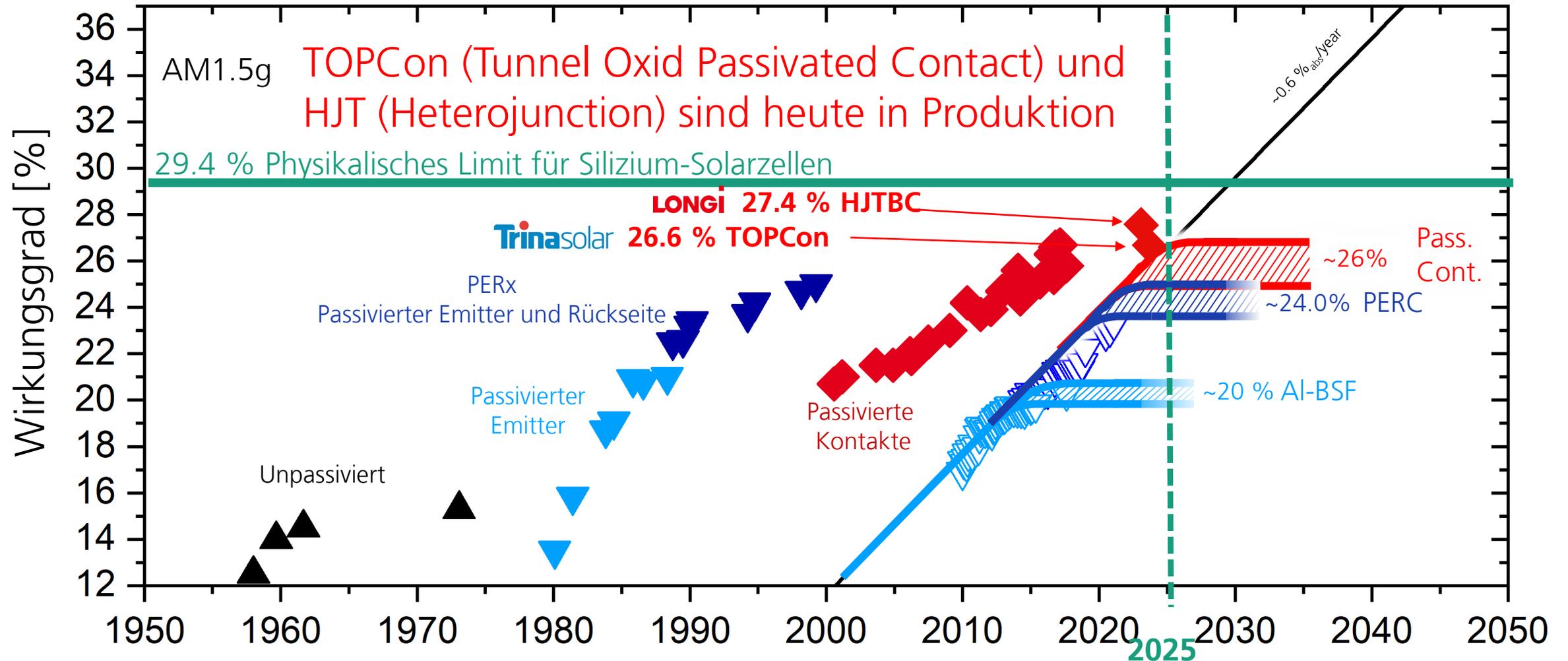
3 Produktion und Resilienz

4 Zusammenfassung



# Wirkungsgrade von Solarzellen - Geschichte und aktueller Stand

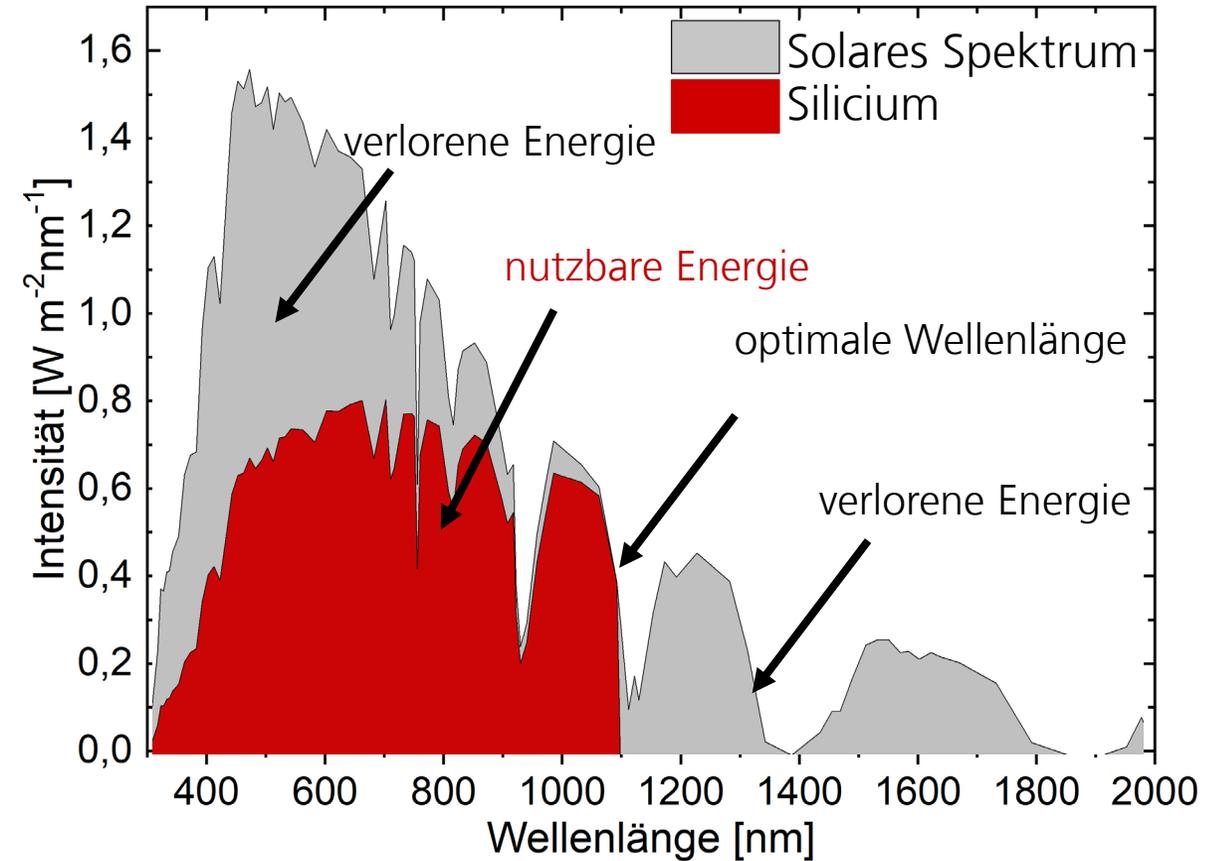
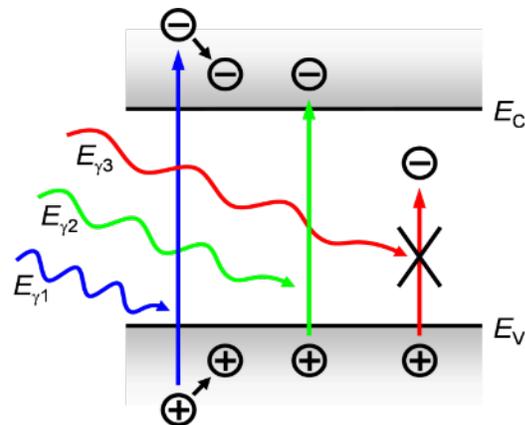
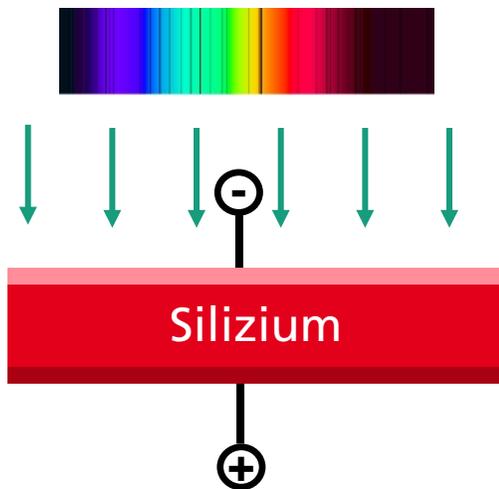
Labor-Rekorde (Symbole) und industrielle Produktionswerte (Linie)



# Das physikalische Effizienzlimit

Das Sonnenspektrum ist breit

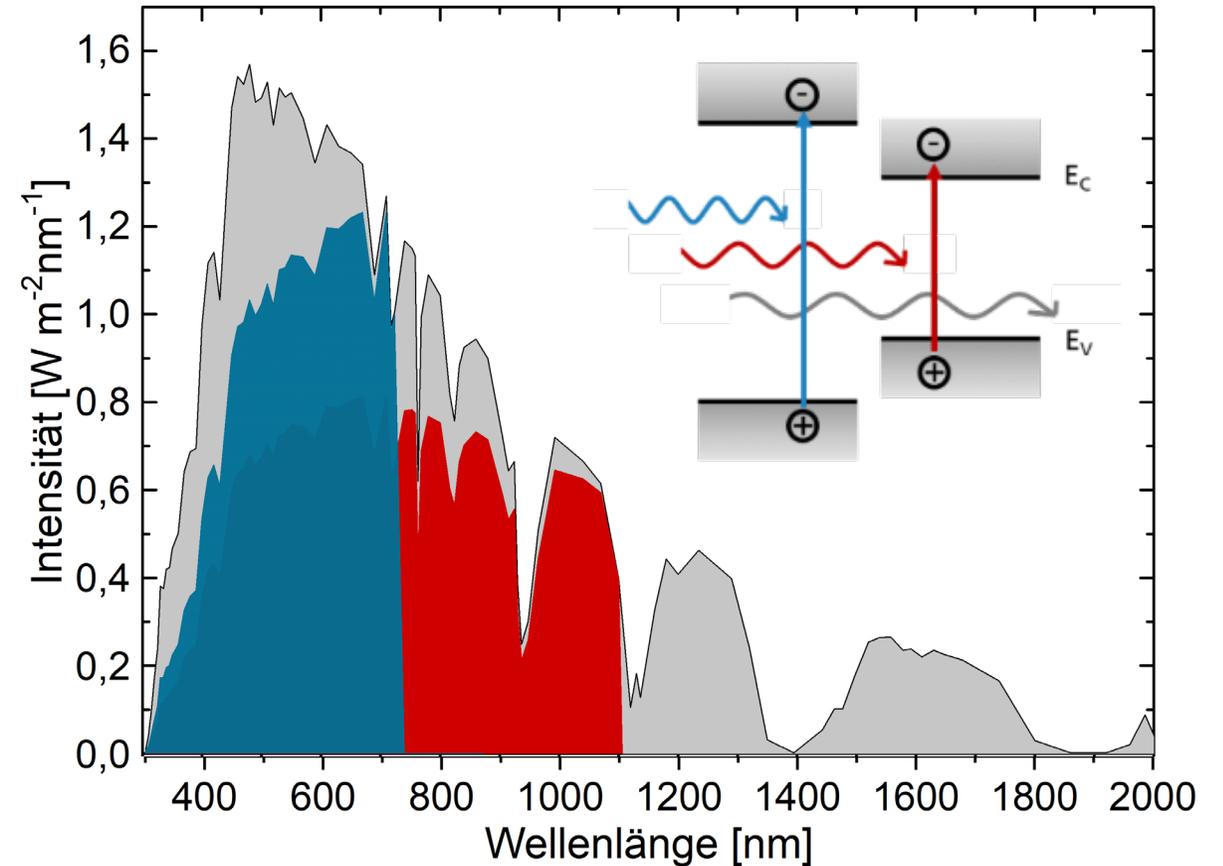
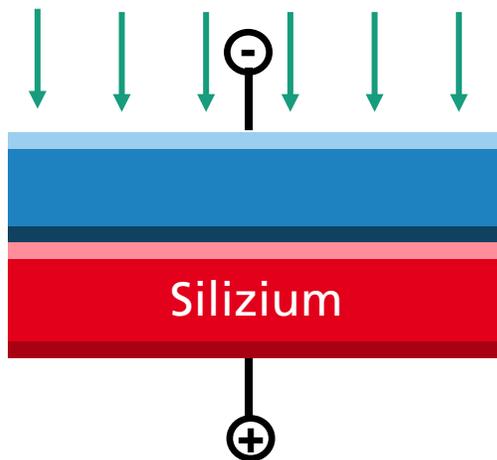
- Die Sonne hat ein breites Spektrum an Farben/Wellenlängen.
- Nur eine Wellenlänge kann von einem Solarzellentyp effizient genutzt werden.



# Das physikalische Limit von Silizium-Solarzellen überschreiten

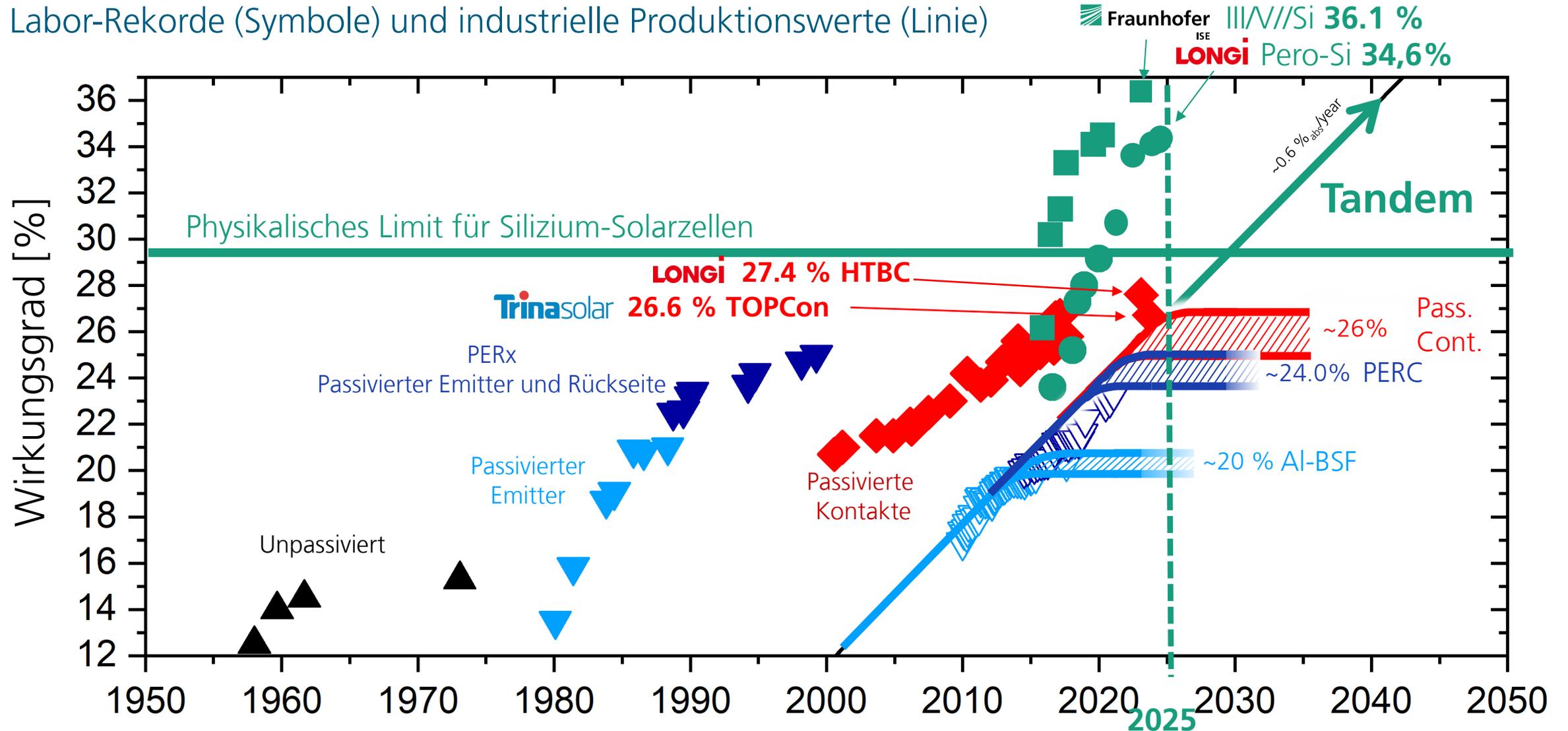
## Tandem-Solarzelle

- Die Sonne hat ein breites Spektrum an Farben/Wellenlängen.
- Nur eine Wellenlänge kann von einem Solarzellentyp effizient genutzt werden.
- Zwei Solarzellenmaterialien können das Spektrum aufteilen - Tandemsolarzellen



# Wirkungsgrade von Solarzellen - Geschichte und aktueller Stand

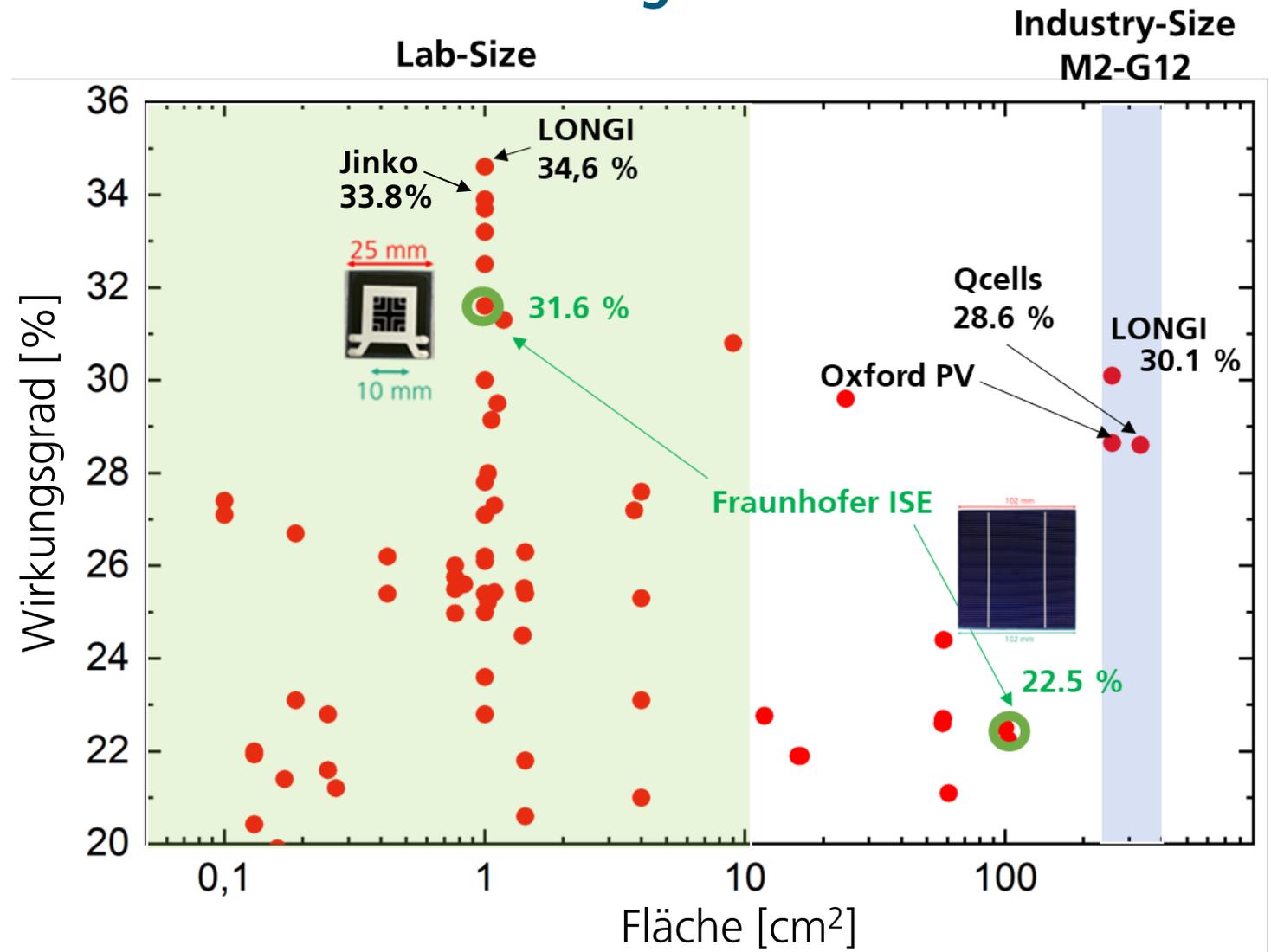
Labor-Rekorde (Symbole) und industrielle Produktionswerte (Linie)



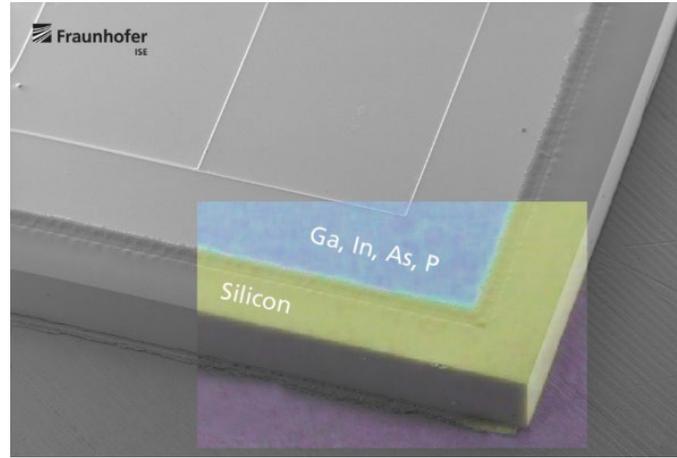
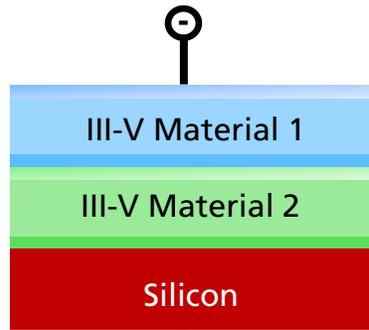
# Perowskit-Silizium Tandem-Solarzellen: Status Technologie

## Vom Pixel zur großflächigen Zelle

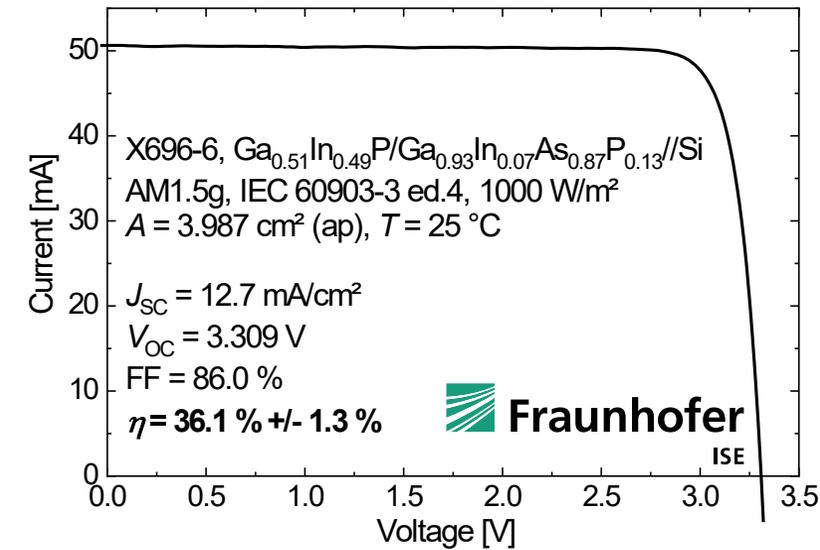
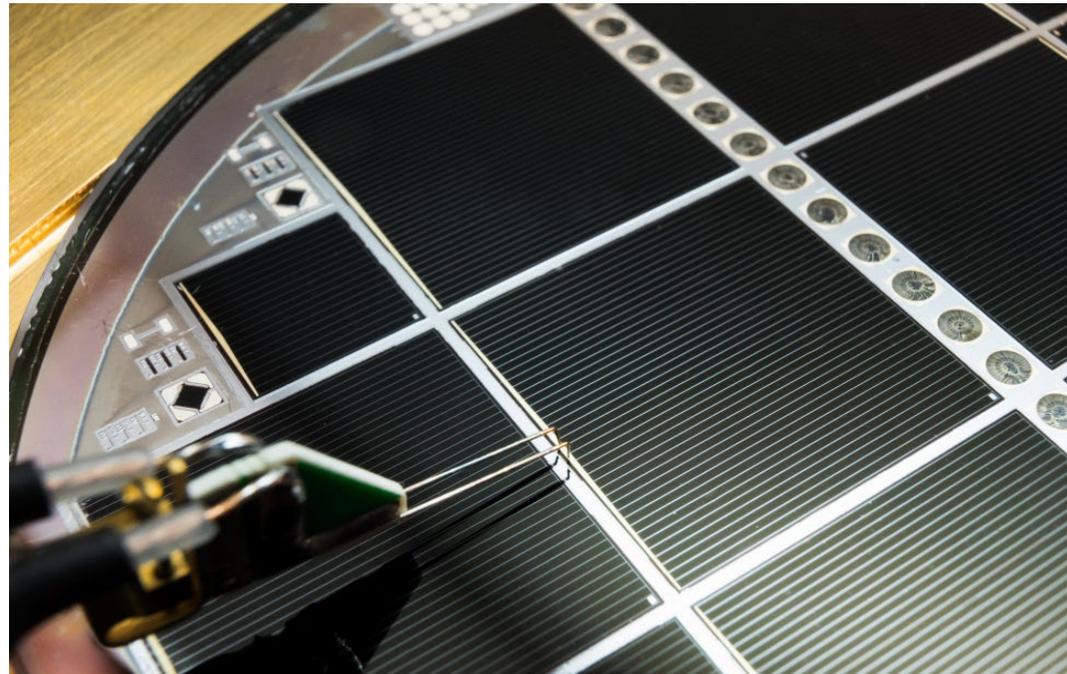
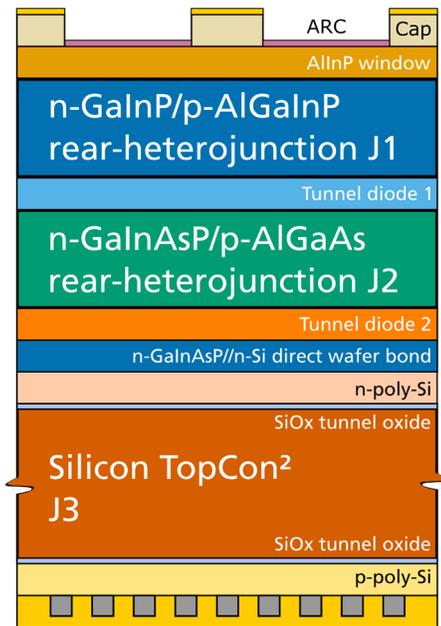
- Die meisten veröffentlichten Wirkungsgrade beziehen sich auf Zellen in Laborgröße  $< 10 \text{ cm}^2$
- $\sim 4,5 \%$  <sub>abs</sub> Unterschied zwischen **kleinen Rekordzellen** und **Zellen in Industriegröße!**
- Die technologische Entwicklung der PV schreitet weiter voran: hohe Wirkungsgrade demonstriert!
- Europäische Akteure spielen hier eine wichtige Rolle!
- Die Stabilität der Zellen ist noch eine Forschungsfrage



# III-V//Silizium Tandem Zellen



**36,1% (AM1,5g)**  
 Rekord für monolithische  
 Tandemzellen auf Siliziumbasis



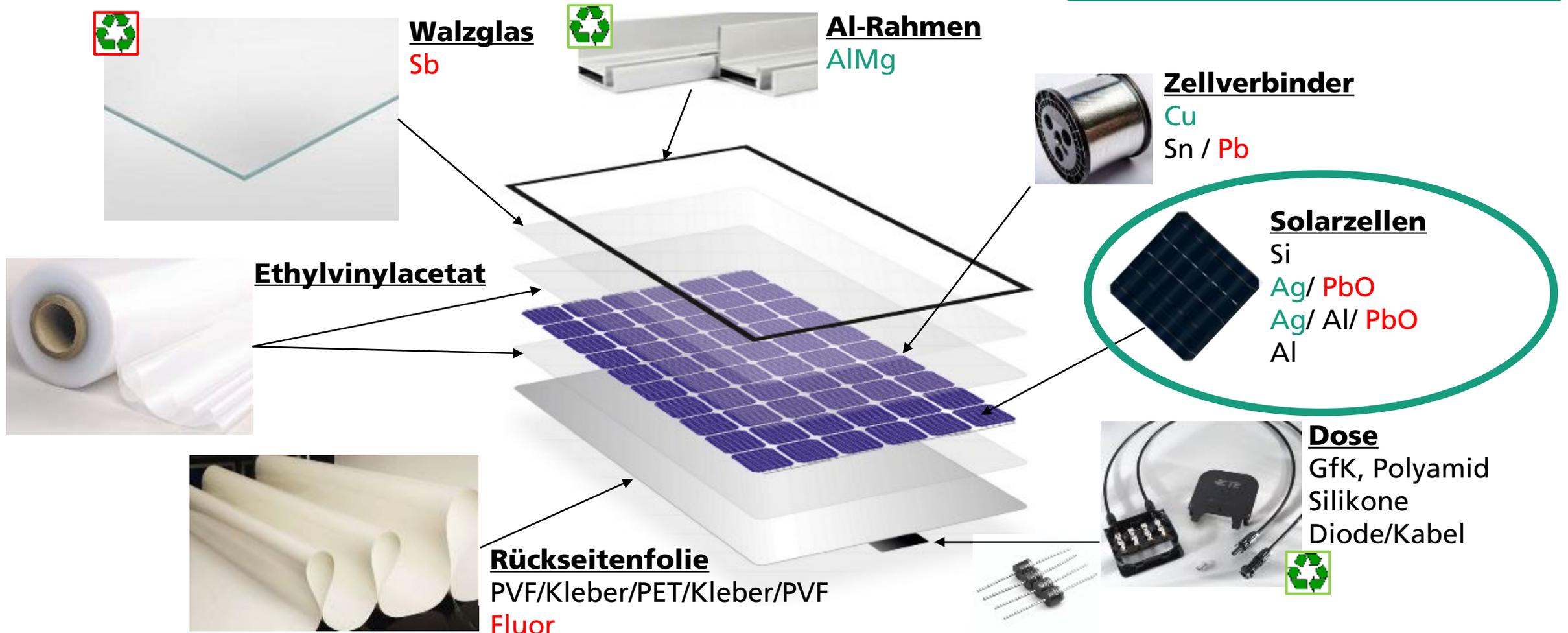
# Was steckt eigentlich in einem PV-Modul?

Forschung für nachhaltige und angepasste Module!

Legende:

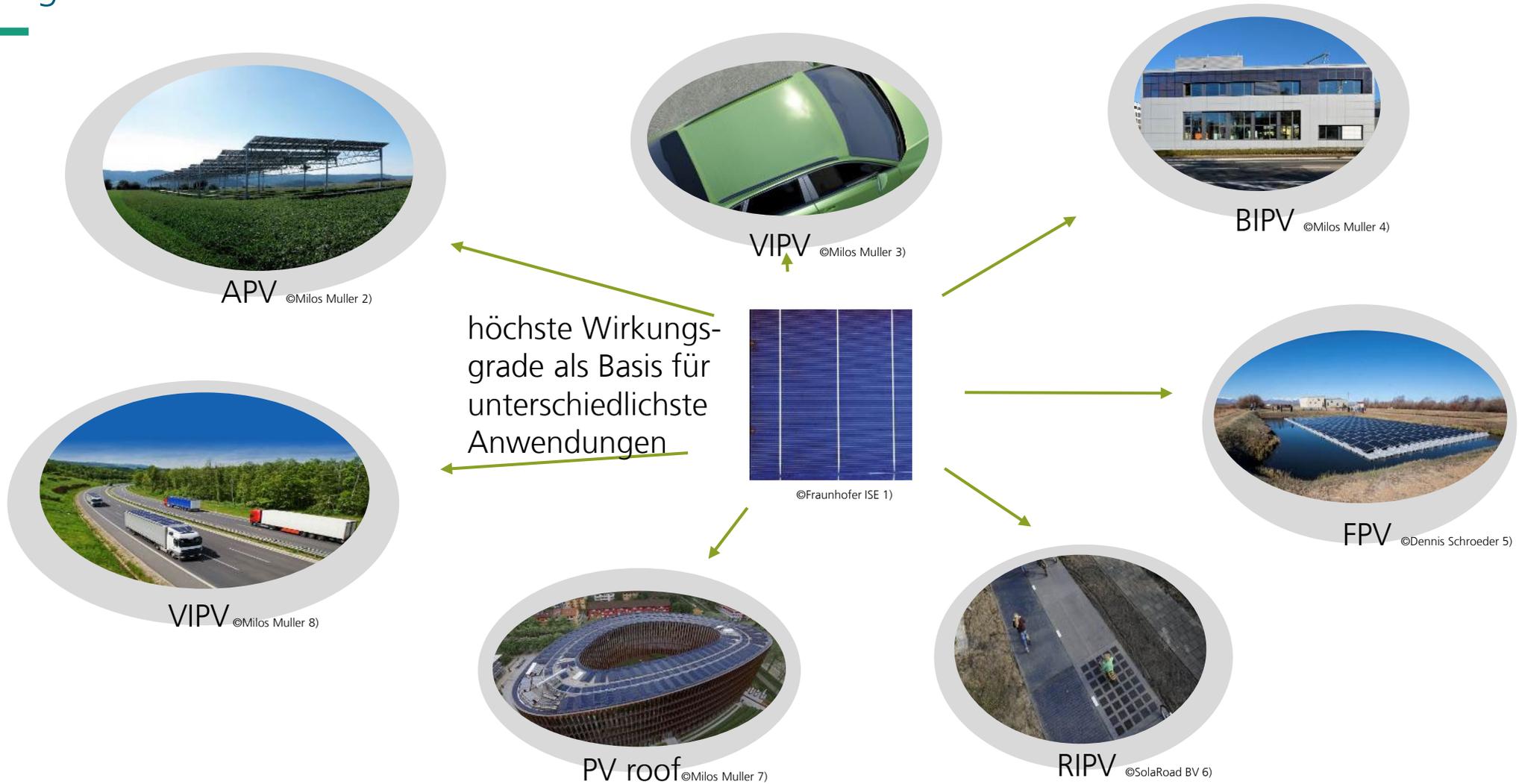
seltene/wertvolle Materialien

Gefahrstoffe



# PV-Anwendung und angepasste Modultechnologie

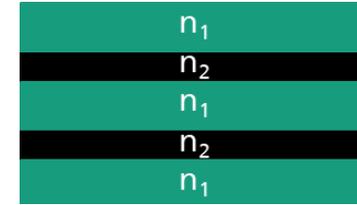
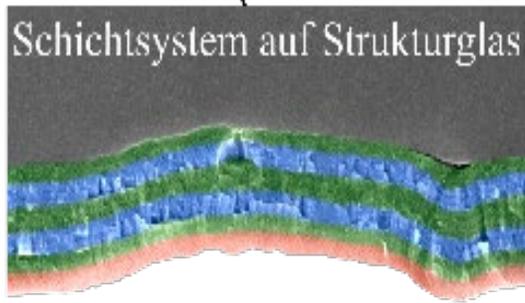
## Integrierte Photovoltaik



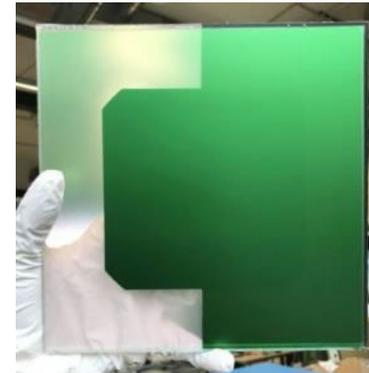
# Fassadenintegration

Integration in vorhandene Flächen

- Solarzellen sind nicht mehr sichtbar!
- patentierte Technologie



MorphoColor



# Agenda

1 Photovoltaik: Eine Erfolgsgeschichte

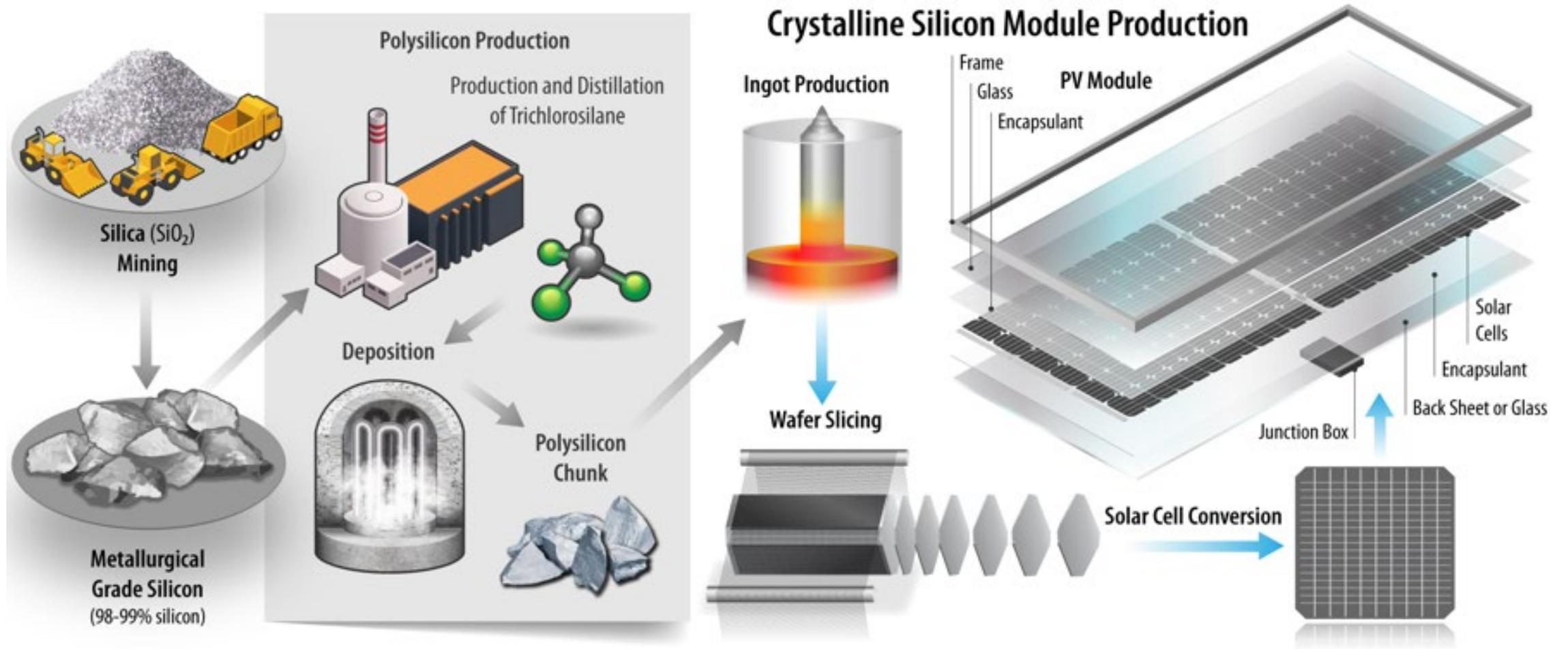
2 Technologie Entwicklung

3 **Produktion und Resilienz**

4 Zusammenfassung

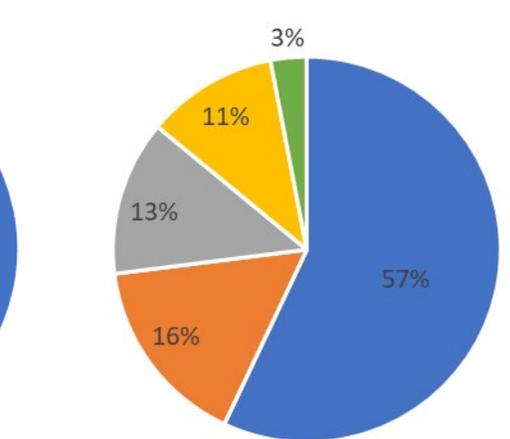
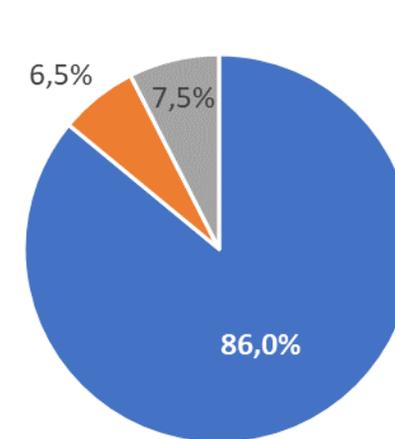
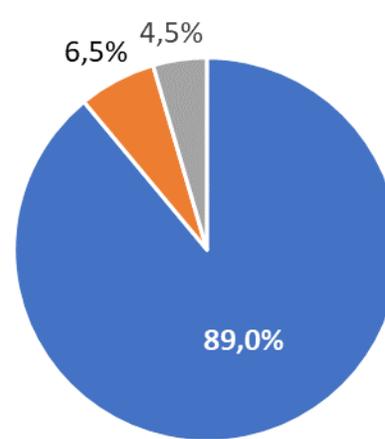
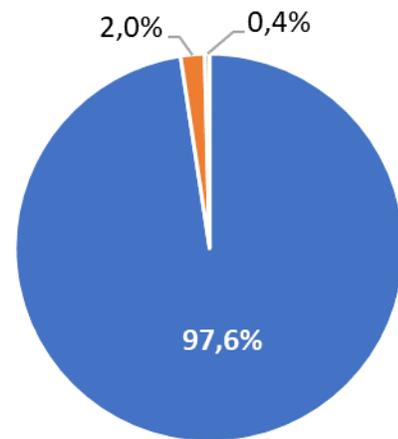
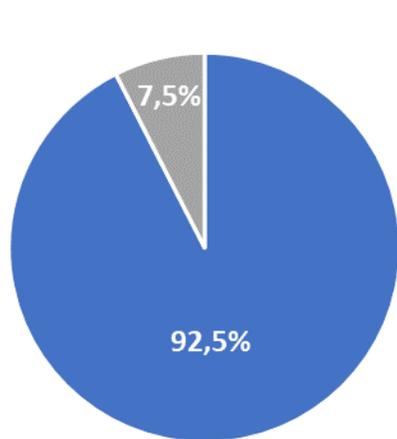


# Die Photovoltaik Wertschöpfungskette



# Globale Verteilung der Herstellkapazitäten über die Wertschöpfungskette

Monopolstellung China! (Status Q4/2023)



■ China ■ SE Asia ■ ROW [1]

■ China ■ Europa ■ USA ■ APAC ■ ROW

[2]

# Durchschnittliche Modulproduktionskosten (NREL/RCT/ISE)

Analyse von »vollständig lokal« hergestellten PV-Modulen in verschiedenen Regionen



Module

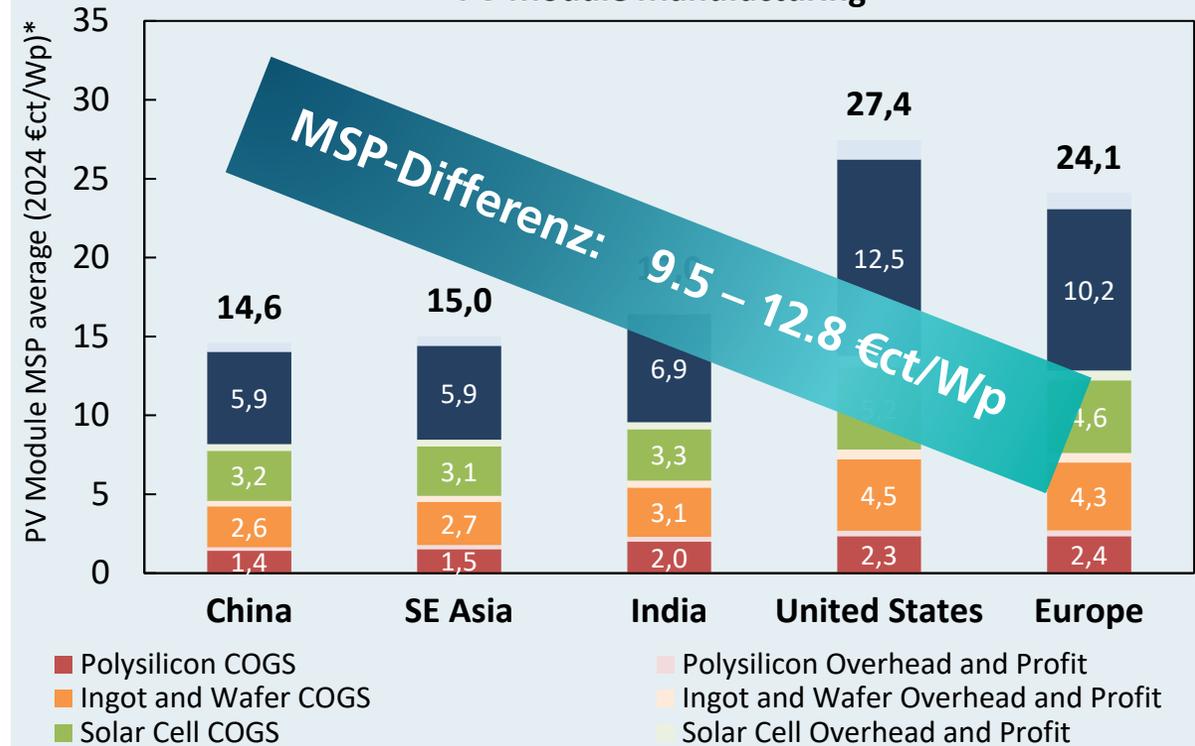
## Sind europäische PV-Module wirklich teurer als asiatische?

Diese Frage wurde in einer gemeinsamen Analyse vom NREL, RCT und ISE untersucht.

Berechnet wird der Mindestpreis der Gesamtkostendeckung für jede Produktionsstufe. Man spricht von *Minimum Sustainable Price (MSP)*.

Im Preis enthalten sind:  
Produktionskosten, Gemeinkosten und Gewinne

NREL/RCT/ISE Averaged MSP Results for "fully-local" TOPCon PV Module Manufacturing



\*with 22.5% PV module efficiency and 2.1 g/Wp silicon consumption

# Europäische Resilienz

## Pro Argumente



**PV ist eine der Hauptsäulen der Energiewende.**

**Eine europäische PV-Produktion erhöht die europäische Resilienz.**

- 1. »Energiesicherheit«: Kostengünstige Energie sichert den Industriestandort Deutschland!**
  - Durch industrielle Fertigung in Europa wird die technologische Souveränität und Weiterentwicklung sichergestellt.
- 2. Durch »ausreichende Fertigungskapazitäten« wird ein Ökosystem geschaffen:**
  - Es sichert Arbeitsplätze und industrielle Wertschöpfung.
  - Die Kostendifferenz zu China kann reduziert werden.
- 3. »Innovationen« stehen in den F&E-Labors in Europa für den Transfer zur Verfügung**

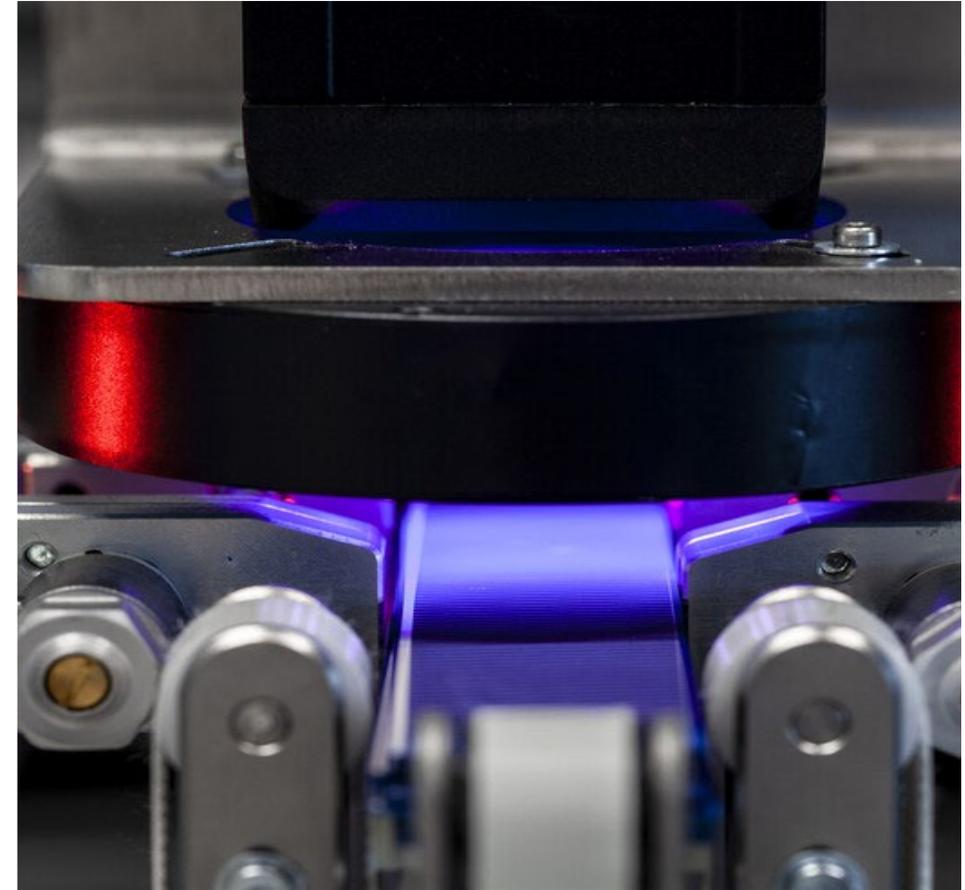
# Agenda

1 Photovoltaik: Eine Erfolgsgeschichte

2 Technologie Entwicklung

3 Produktion und Resilienz

4 Zusammenfassung



# Zusammenfassung

---

**Die Technologieentwicklung im Bereich der Photovoltaik ist nicht zu Ende und muss weitergeführt werden!**

**Innovationen entlang der Wertschöpfungskette bei der Silizium-Photovoltaik sind im Gange:**

- Kerfless Wafertechnologie (NexWafe)
- höhere Zellwirkungsgrade durch Tandemstrukturen mit Silizium als Unterzelle (OxfordPV)
- integrierte PV-Anwendungen, BIPV, APV, VIPV, FPV, Moor-P .... (Spezialmodule notwendig!)
- nicht zu vergessen: Wechselrichter (Mittelspannungs-WR, Netzbildende-WR ...) und Installation

**Höhere Wirkungsgrade durch Tandemstrukturen – auch ohne Silizium (47 % wurden demonstriert)!**

**Resilienz und/oder technologische Souveränität ist für Europa und das Voranbringen der Energiewende in Deutschland ein weiterer Aspekt, den es umzusetzen gilt!**

**→ Unterstützung wie das EEG vor 25 Jahren sind notwendig!**

# Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

---

**Prof. Dr. Andreas Bett**  
Institutsleiter

Fraunhofer ISE  
Heidenhofstraße 2  
79110 Freiburg  
[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)

[andreas.bett@ise.fraunhofer.de](mailto:andreas.bett@ise.fraunhofer.de)

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Professur "Solare Energie – Materialien  
und Technologien  
Fakultät für Mathematik und Physik  
79104 Freiburg  
[andreas.bett@physik.uni-freiburg.de](mailto:andreas.bett@physik.uni-freiburg.de)

