

# Energiewende – Chancen und Risiken

Anlass: Vortrag für die Museums-  
und Lesegesellschaft

Referent: Prof. Andreas Bett

10. November 2025  
[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)





# Agenda

1

**Das Fraunhofer ISE**

2

Motivation und Einführung

3

Deutsche Energiesystemtransformation

4

Europäische Photovoltaik Industrie

5

Europäische Photovoltaik Forschung

6

Zusammenfassung



# Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Forschung und Entwicklung für die Energiewende seit 1981

## Auf einen Blick

Institutsleiter

- Prof. Dr. Andreas Bett

Mitarbeitende

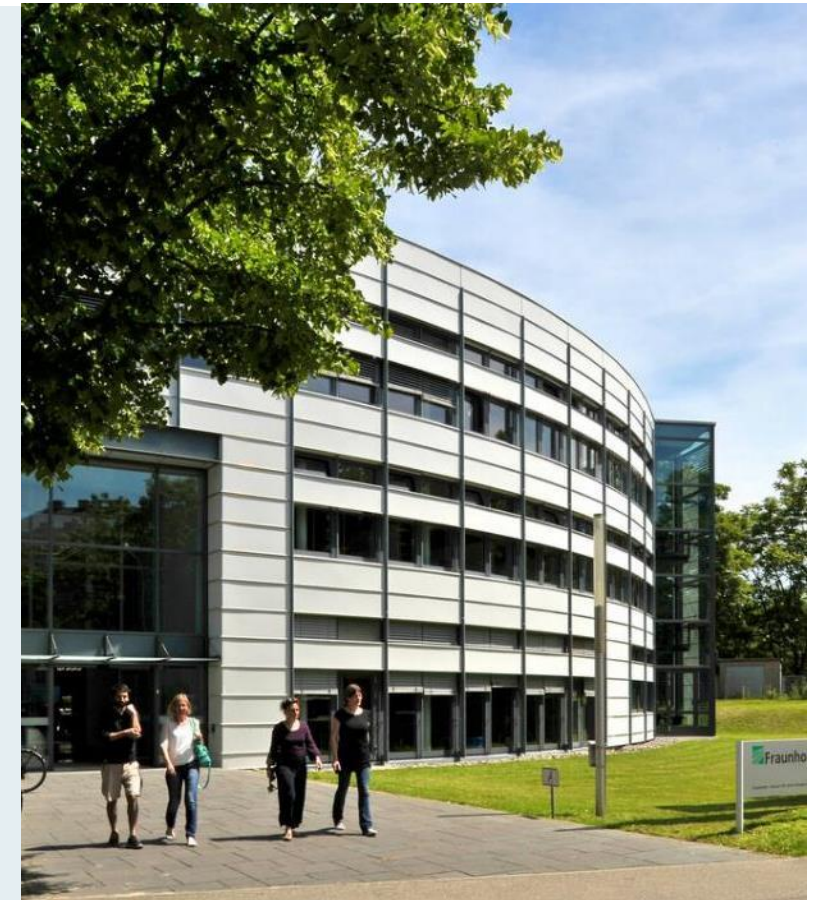
- ca. 1400

Budget 2024

- 157,8 Mio €

## Geschäftsfelder

- PV – Materialien, Zellen, Module
- PV – Produktionstechnologie und Transfer
- Klimaneutrale Wärme und Gebäude
- Solarkraftwerke und Integrierte PV
- Leistungselektronik und Stromnetze
- Elektrische Energiespeicher
- Wasserstofftechnologien
- Systemintegration



Stand: Juni 2025

# Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Das Institut in Zahlen (2024)



Stand: Juni 2025

# Agenda

1

Das Fraunhofer ISE

2

**Motivation und Einführung**

3

Deutsche Energiesystemtransformation

4

Europäische Photovoltaik Industrie

5

Europäische Photovoltaik Forschung

6

Zusammenfassung



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



# Bevölkerungswachstum und Klimawandel

## Einleitung

Anstieg  
und zu

DIE ZEIT

### Treibhausgase CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre steigt so hoch wie nie seit 1957

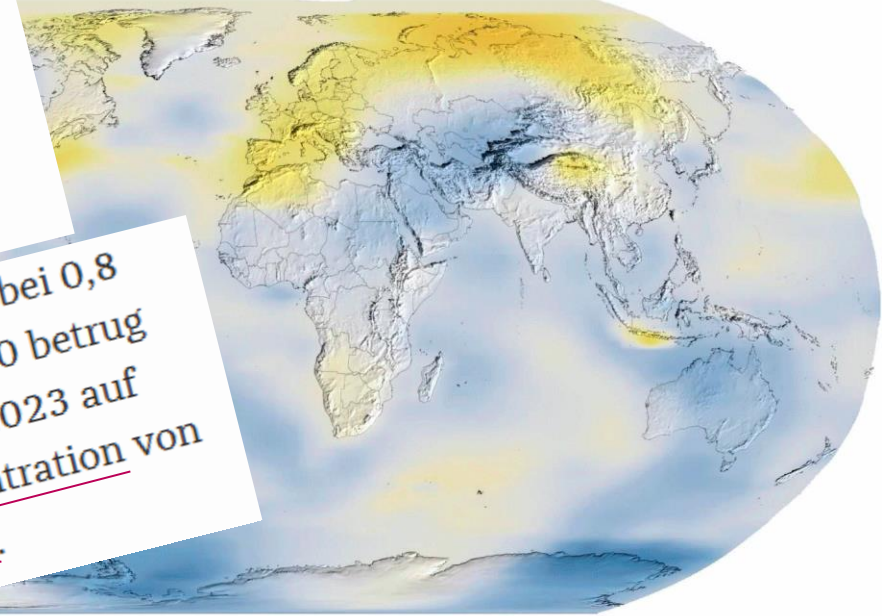
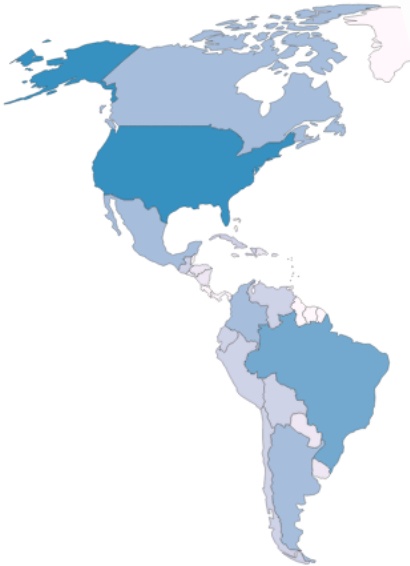
Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre ist der Weltorganisation für Meteorologie zufolge so stark angestiegen wie nie zuvor. Auch andere Treibhausgase nehmen rasant zu.

Aktualisiert am 15. Oktober 2025, 13:38 Uhr ⓘ Quelle: DIE ZEIT, AFP, hap

In den 1960er-Jahren lag der CO<sub>2</sub>-Anstieg pro Jahr laut WMO bei 0,8 ppm (Teilchen pro Million Teilchen). Zwischen 2011 und 2020 betrug der jährliche Anstieg bereits durchschnittlich 2,4 ppm. Von 2023 auf 2024 stieg die Konzentration dann um 3,5 ppm. Die Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre lag 2024 insgesamt bei 423,9 ppm.

Wärmung des Klimas, extreme  
Wetterereignisse

1950





# Ein Fusionsreaktor weit entfernt liefert Energie für die Welt!

$1,5 \cdot 10^{18}$  kWh/Jahr  
10.000 mal mehr als der  
weltweite Energiebedarf

Abstand zur Erde: 149,6 Mio km

Sichtwinkel:  $0.54^\circ$

Leuchtkraft:  $3.846 \cdot 10^{26}$  W

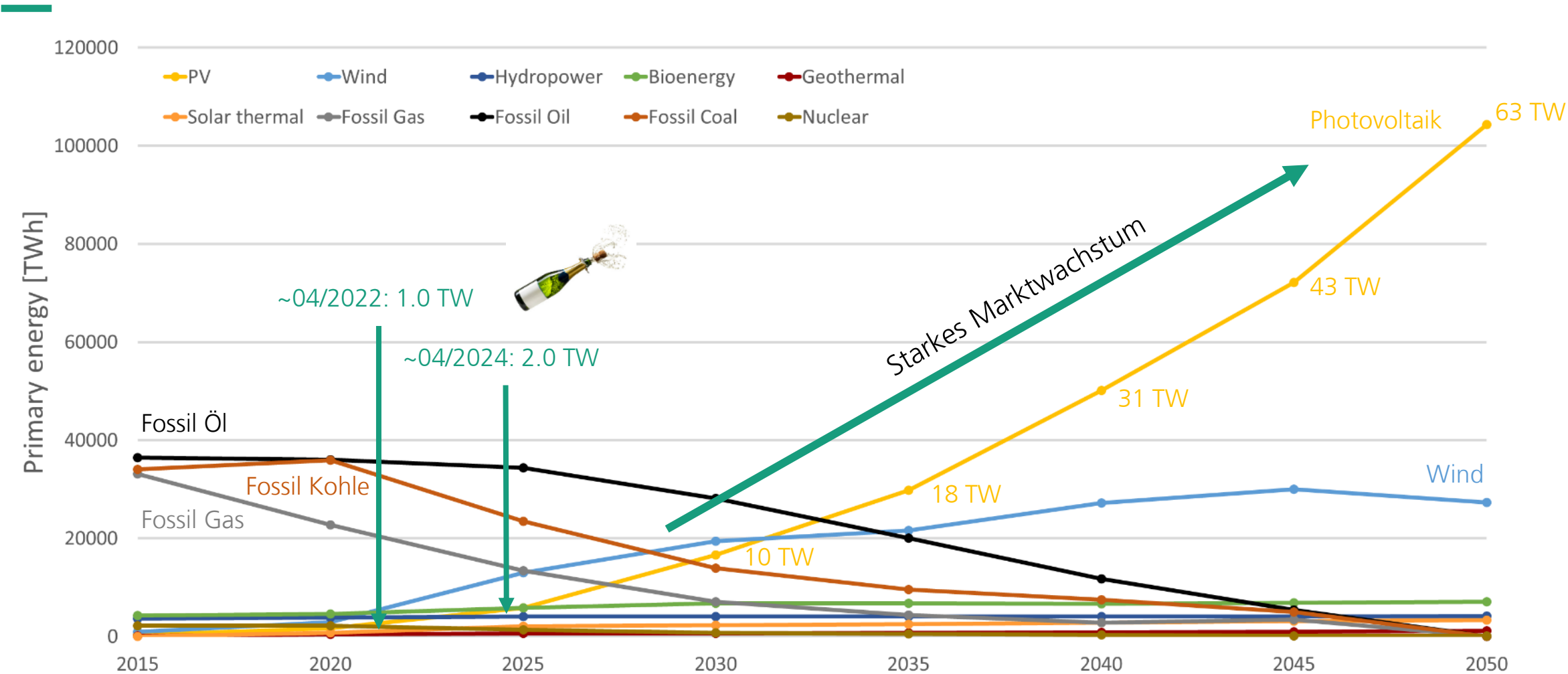
Schwarzkörperstrahlung: 5778 K





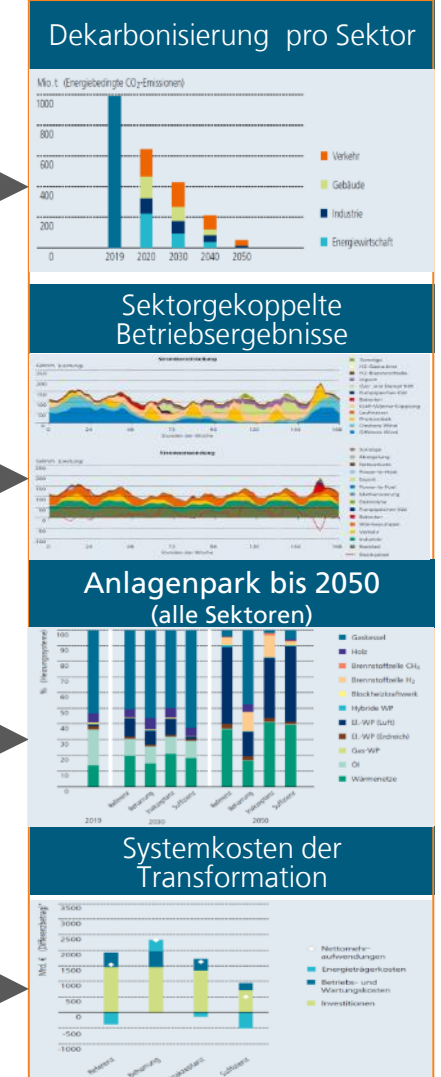
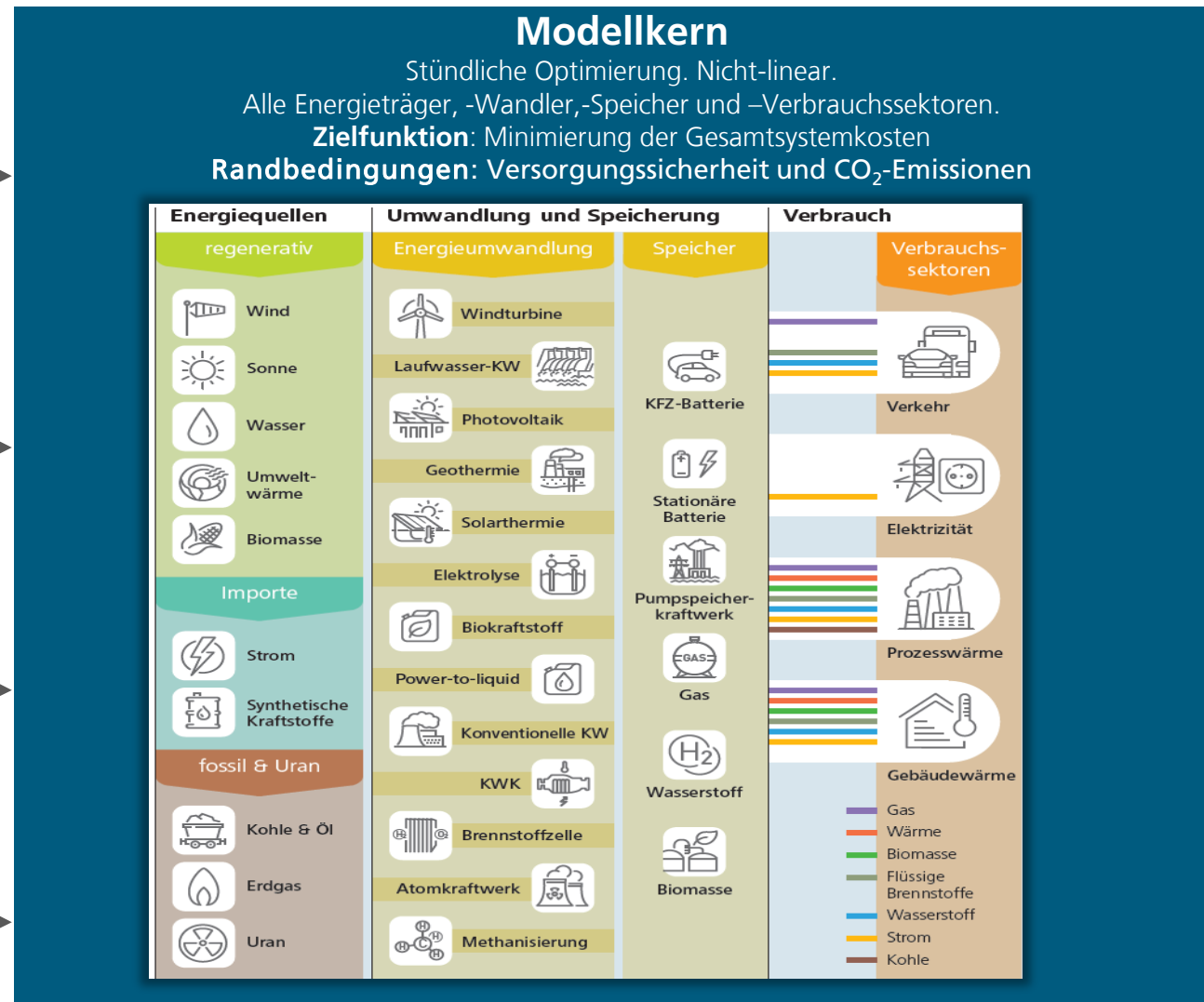
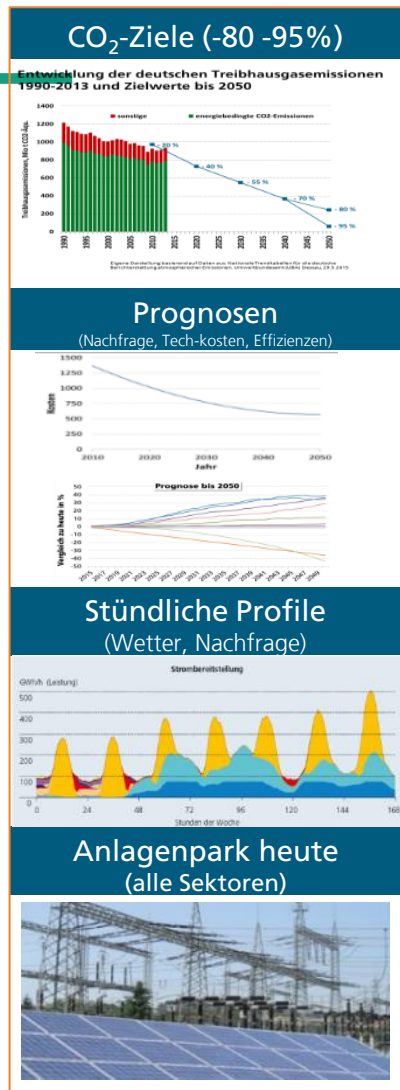
# Globalen Energieversorgung auf dem Weg zur Pariser-Klimazielerreichung

Markt: Photovoltaik wird in großen Mengen benötigt!



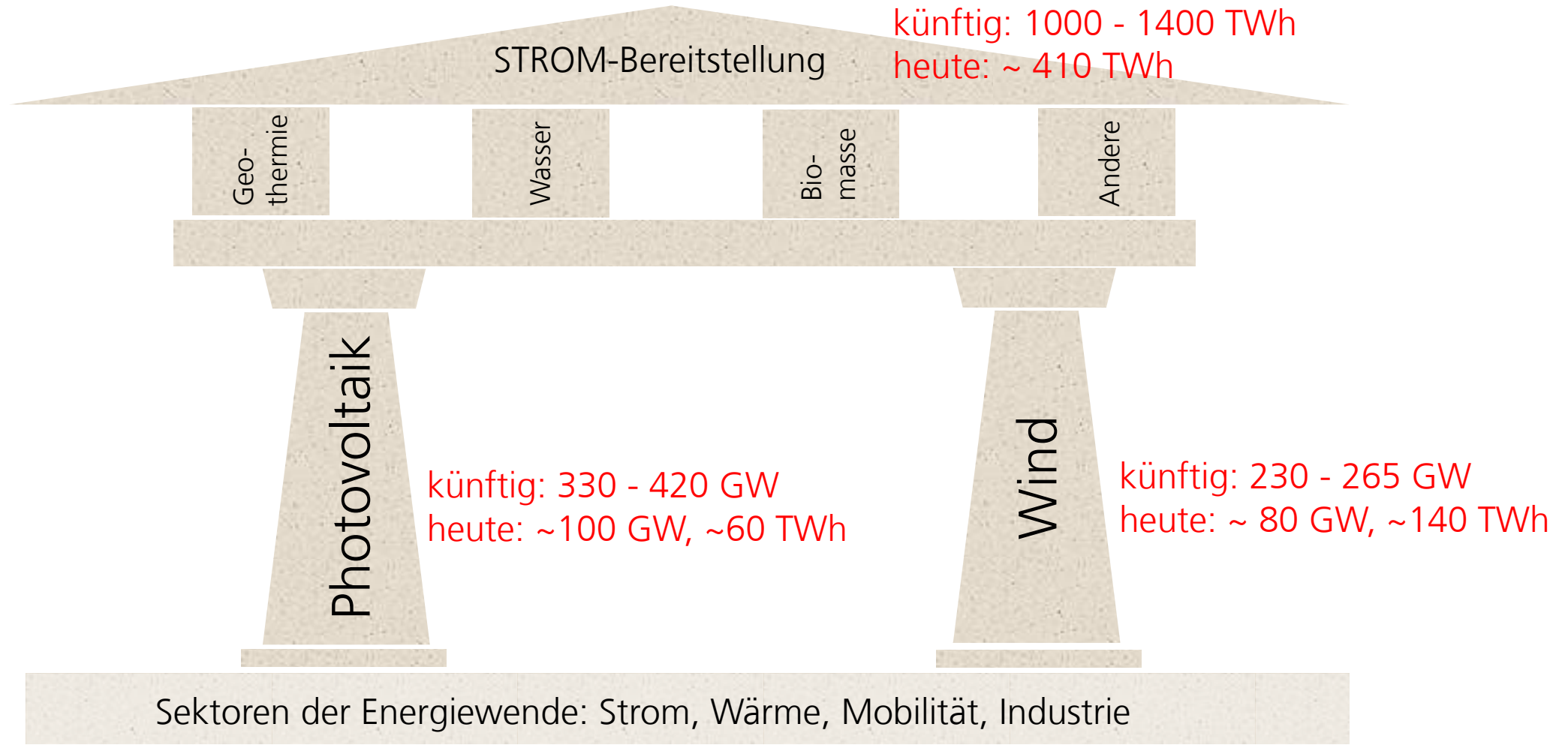


# REMod – Sektorenübergreifendes Energiesystemmodell



# Das Gebäude der Energiewende

Werte für Deutschland



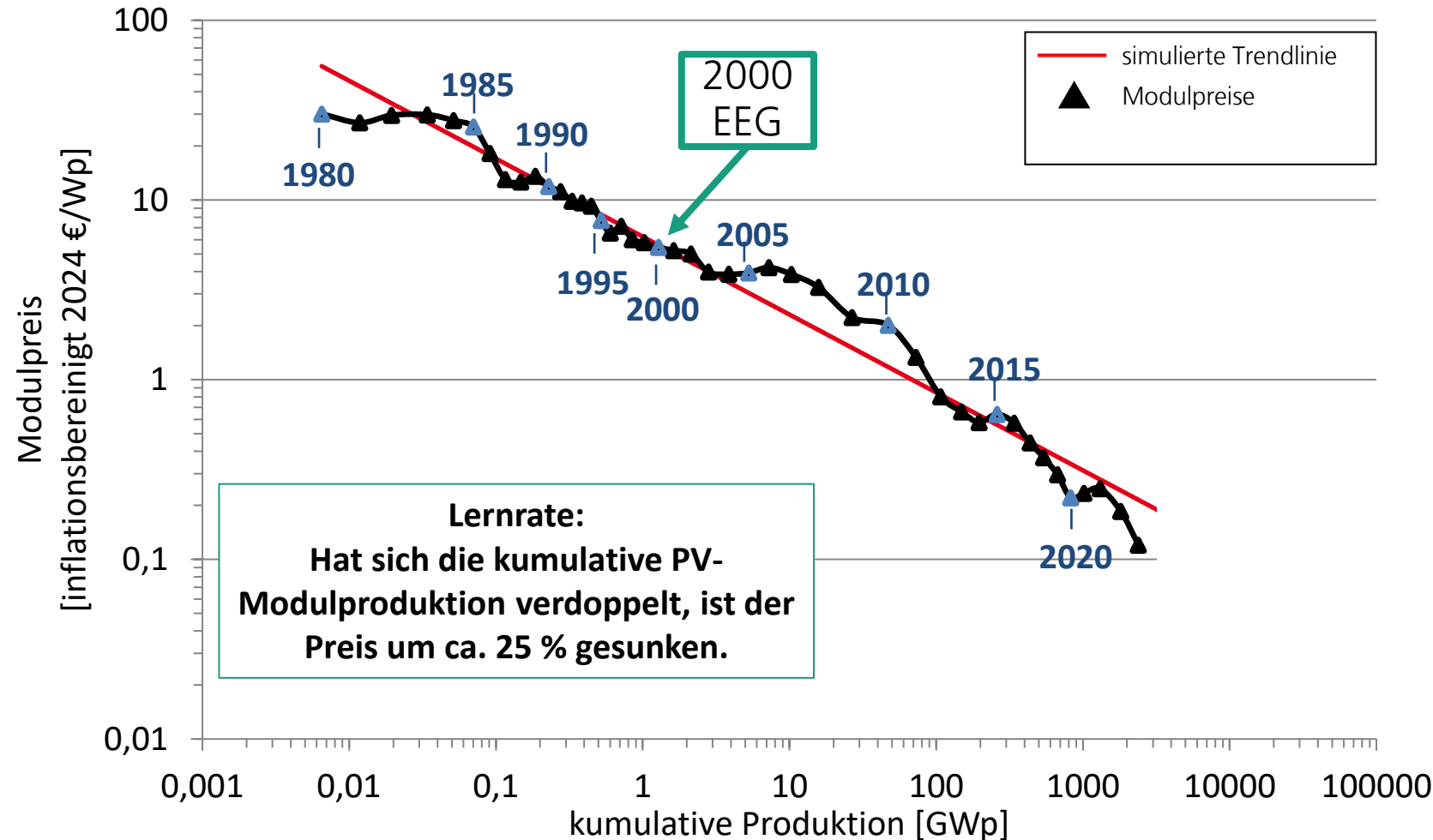


# Die Erfolgsgeschichte der Photovoltaik

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.

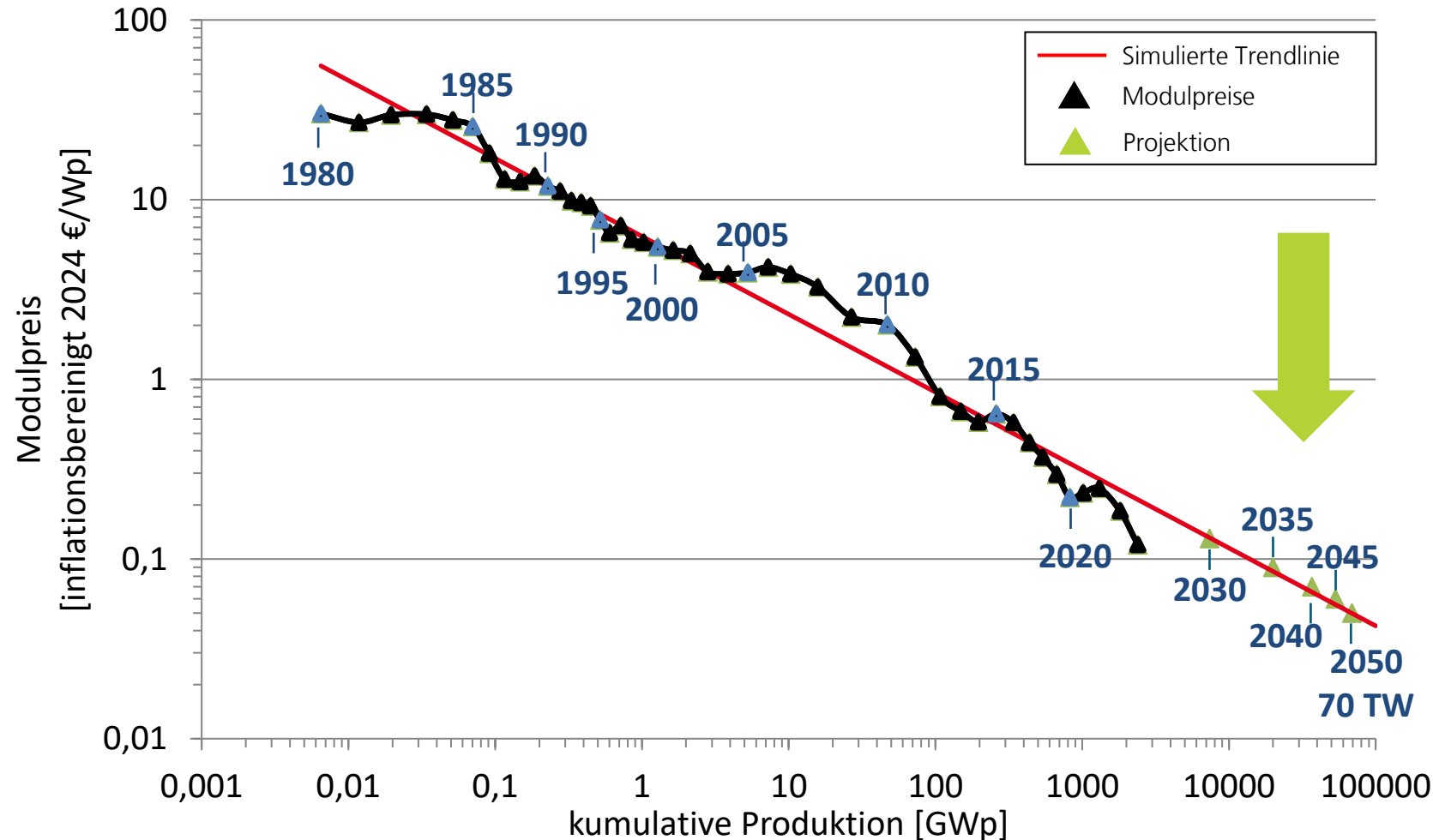


# Die Erfolgsgeschichte der Photovoltaik

PV hat heute die niedrigsten Gestehungskosten in €cent/kWh

## Treibende Faktoren der Preisreduktion:

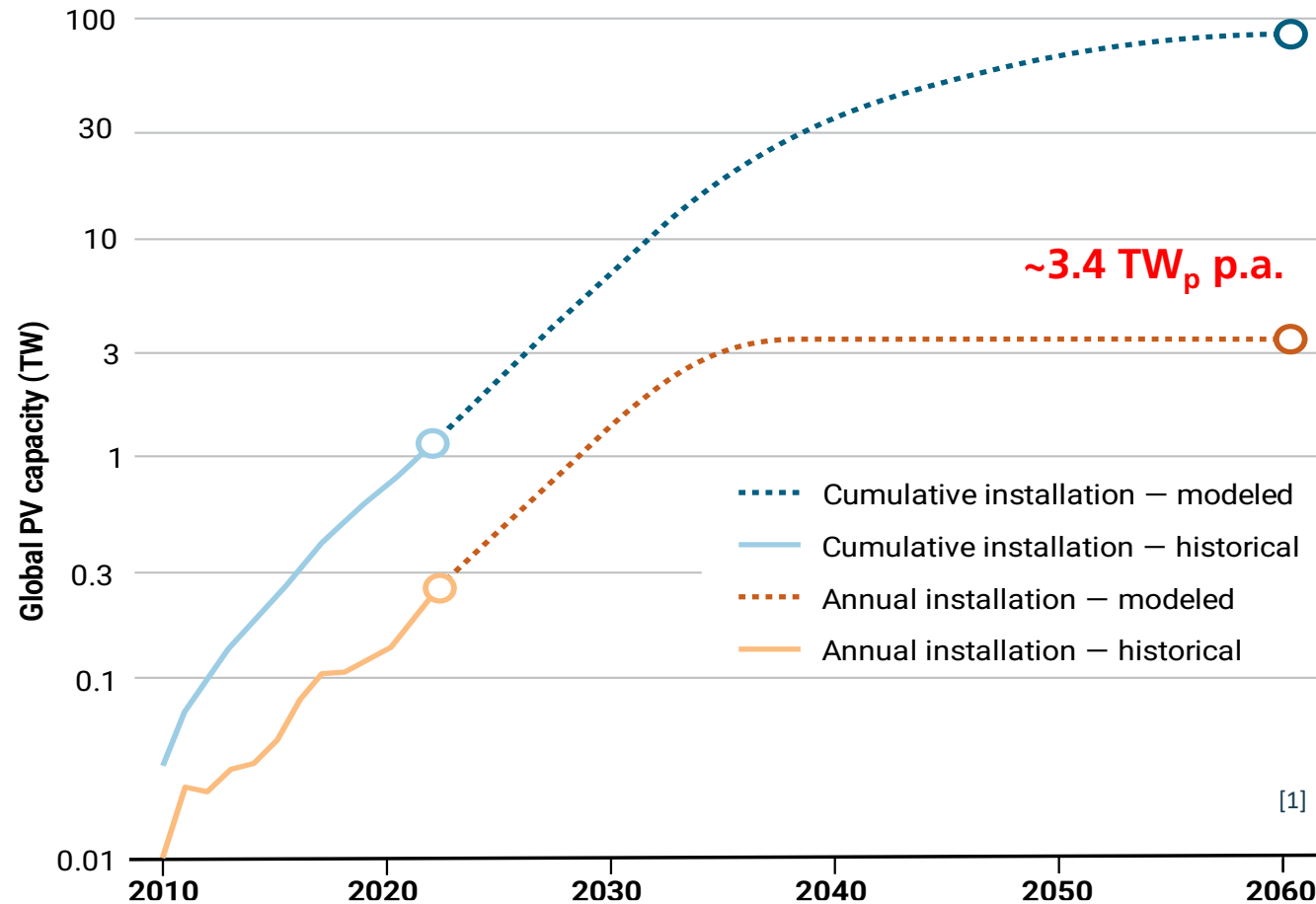
- Verbesserung der Produktionsanlagen (Durchsatz, Ausbeute, Qualität)
- technologische Innovationen (Effizienz, Materialverbrauch, neue Technologien)
- DER Trigger: Geschäftsmodelle! Ermöglicht durch politische Rahmensetzung.
- Wie geht es weiter?





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

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



POLICY FORUM

[1]

RENEWABLE ENERGY

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

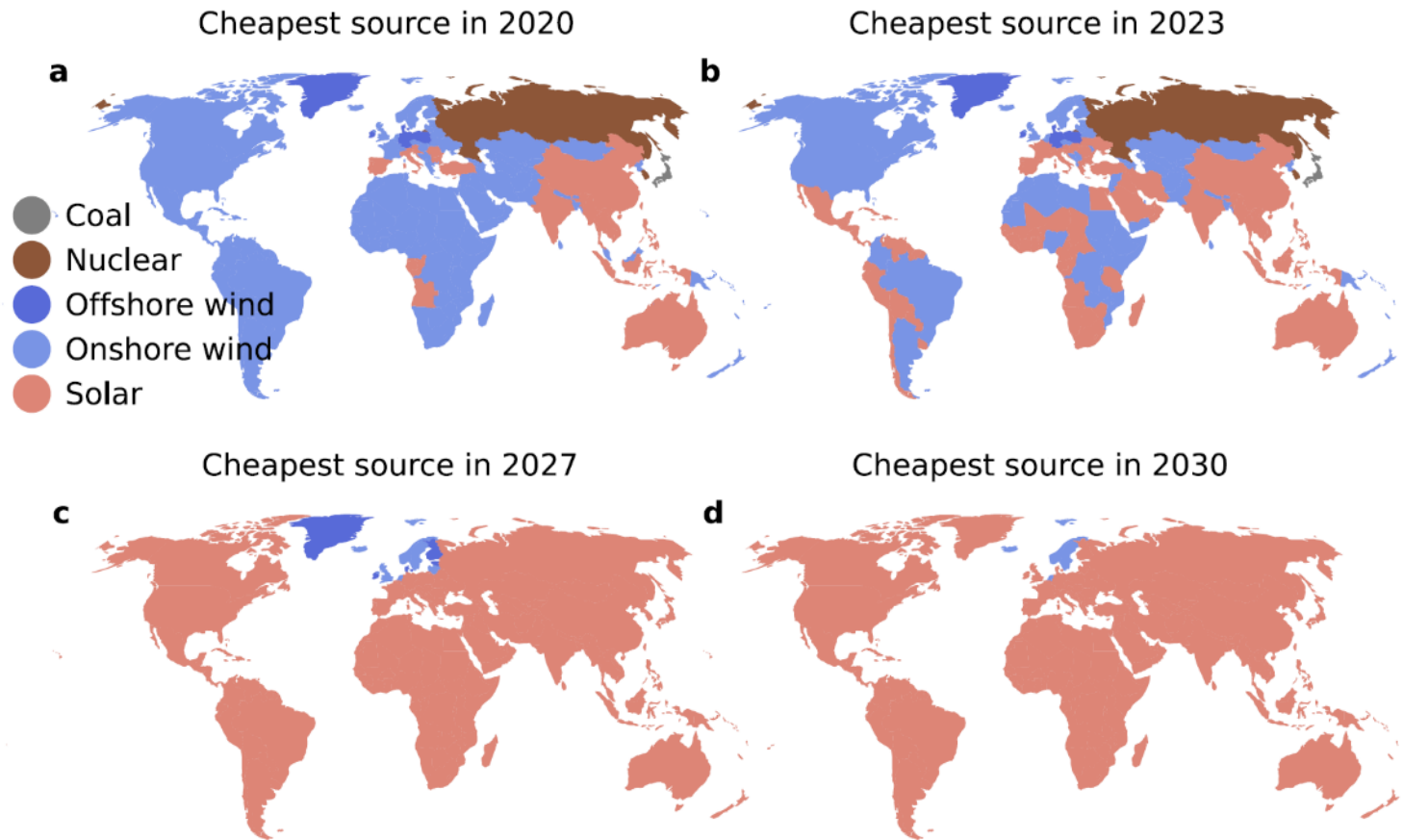
25% annual PV growth is possible over the next decade

By Nancy M. Haegel, Pierre Verlinden, Marta Victoria, Pietro Altermatt, Harry Atwater, Teresa Barnes, Christian Breyer, Chris Case, Stefaan De Wolf, Chris Deline, Marwan Dharmrin, 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



# Niedrigste Stromgestehungskosten per Region

Die Photovoltaik (PV) wird zur tragenden Säule der globalen Energiewende



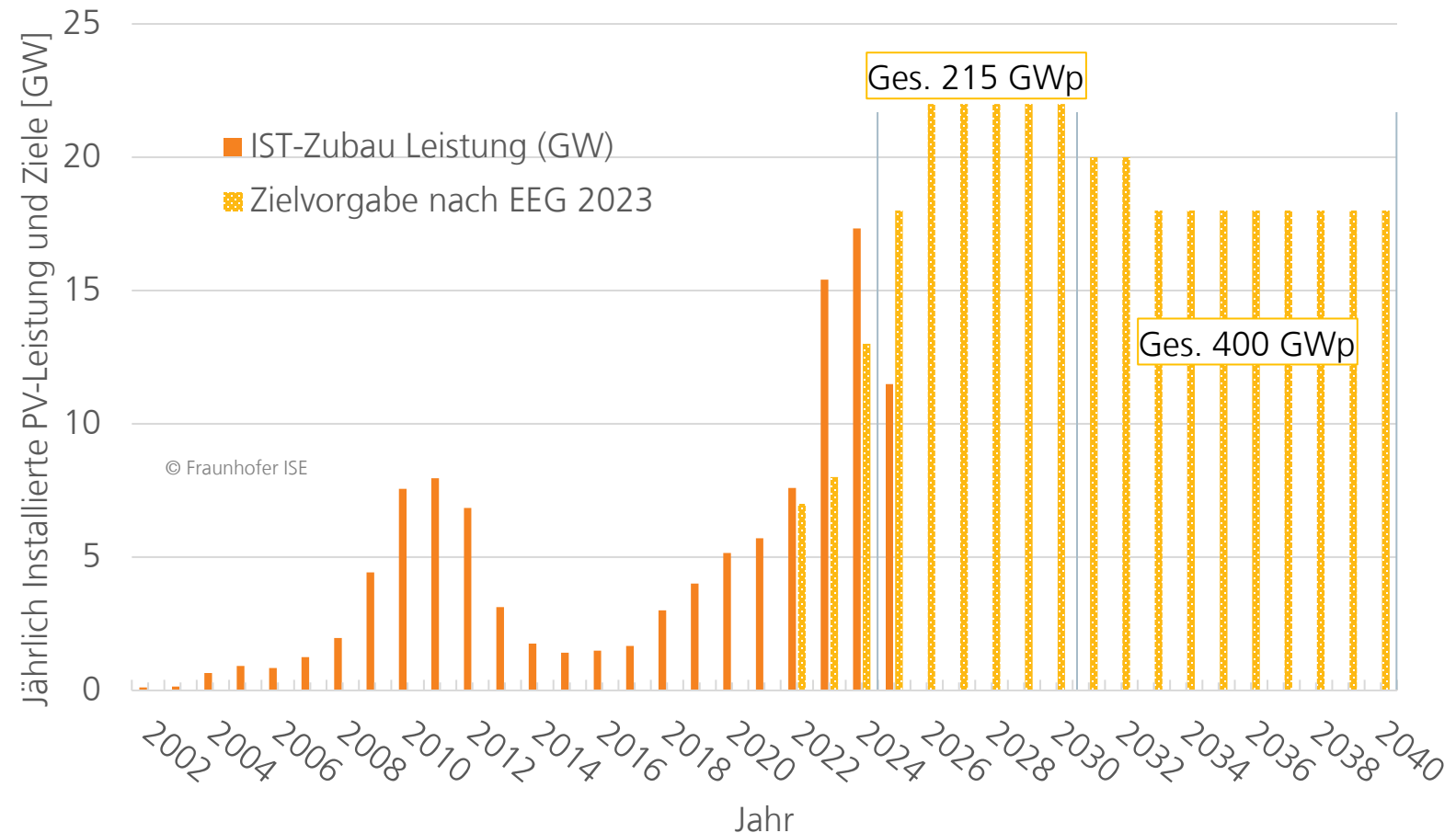
**Bis 2030 wird Solarenergie in fast allen Regionen der Welt die günstigste Stromquelle sein.**



# Auch in der deutschen Energiewende ist PV eine tragende Säule

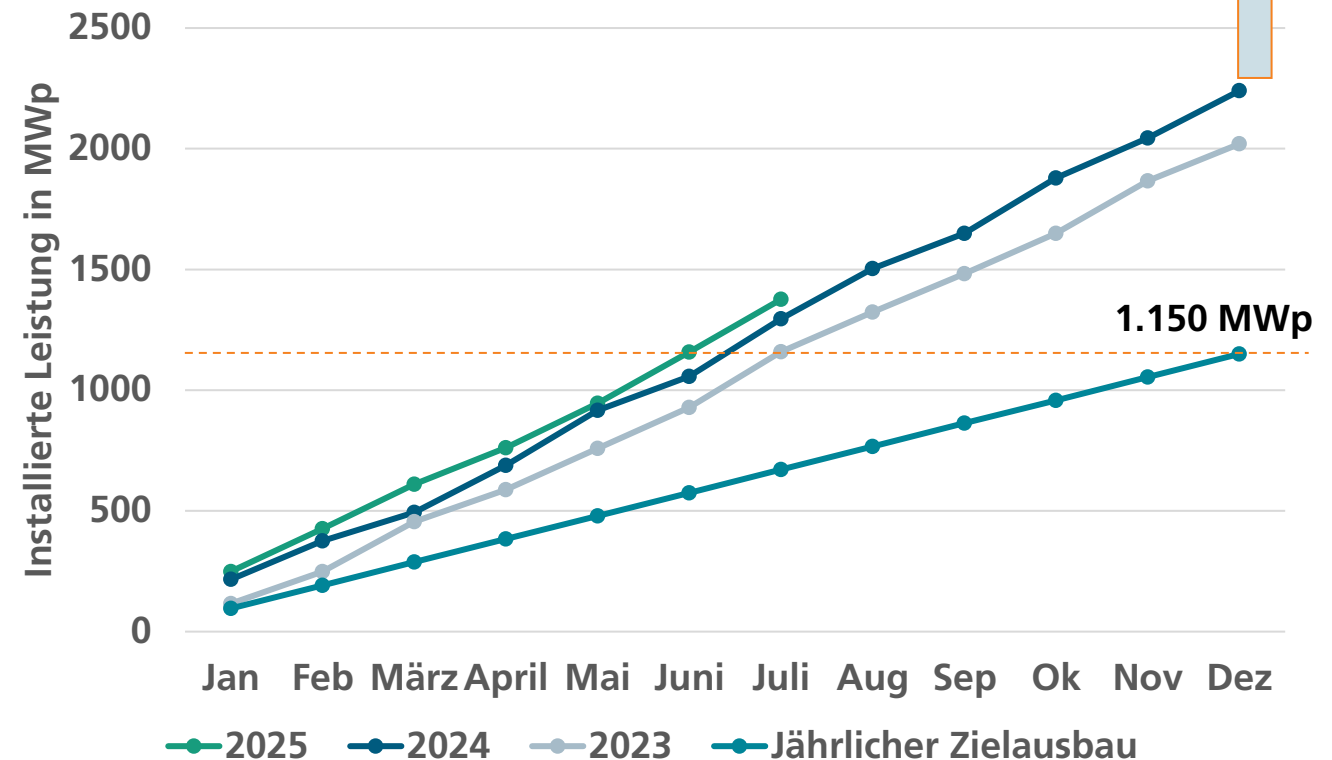
**22 GWp pro Jahr Ausbau ab 2026 erfordert Installation von ca.:**

- Dachanlagen (10 kWp pro Anlage):  
**1.300 Anlagen pro Tag**  
→ 13.000 MW pro Jahr
- Industriedächer (300 kWp pro Anlage): **80 Anlagen pro Tag**  
→ 7.000 MW pro Jahr
- Freiflächenanlagen (5 MWp pro Anlage): **4 Anlagen pro Woche**  
→ 2.000 MW pro Jahr



# PV-Ausbau in Baden-Württemberg

- Die Gesamtleistung in BaWü beträgt 13,8 GWp
- Zur Erreichung der Klimaneutralität sollen es 2030 24,6 GWp sein und 2040 47,2 GWp  
→ Bis 2040 fehlen noch 33,4 GWp
- Nach einer Studie des Solar Clusters Baden-Württemberg, wird künftig ein Photovoltaik-Zubau von 4.000 MWp pro Jahr zur Klimazielerreichung notwendig sein.



Werte aus dem PV-Dashboard,  
Zielzahlen für den Zeitraum 2022-2025 stammen aus dem [Bericht Sektorziele 2030](#)

# Agenda

- 1 Das Fraunhofer ISE
- 2 Motivation und Einführung
- 3 **Deutsche Energiesystemtransformation**
- 4 Europäische Photovoltaik Industrie
- 5 Europäische Photovoltaik Forschung
- 6 Zusammenfassung



Millerntor-Stadion des FC St. Pauli, Visualisierung mit MorphoColor-Modulen von Megasol © Lichtblick



# Für den Erfolg der Energiewende benötigen wir eine Vielfalt an Technologien

Zielwerte 2030 und 2045 auf Basis der Rechnungen mit dem Energiesystemmodell REMod



PV

GW



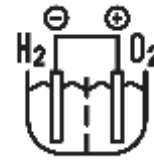
Wind

GW



Batterie

GWh



Elektrolyse

GW



Konventionelle Kraftwerke

GW



Wärmepumpen

Anzahl in Millionen



E-Mobilität: PKW

Anzahl in Millionen



E-Mobilität: LKW

Anzahl in Millionen

2030

Szenarienbandbreite

171  
↕  
202

130  
↕  
144

49  
↕  
104

4  
↕  
11

96  
↕  
111

4,5  
↕  
5,8

12  
↕  
20

0,05  
↕  
0,07

2045

Szenarienbandbreite

332  
↕  
429

231  
↕  
265

118  
↕  
178

44  
↕  
91

138  
↕  
152

12,5  
↕  
14,9

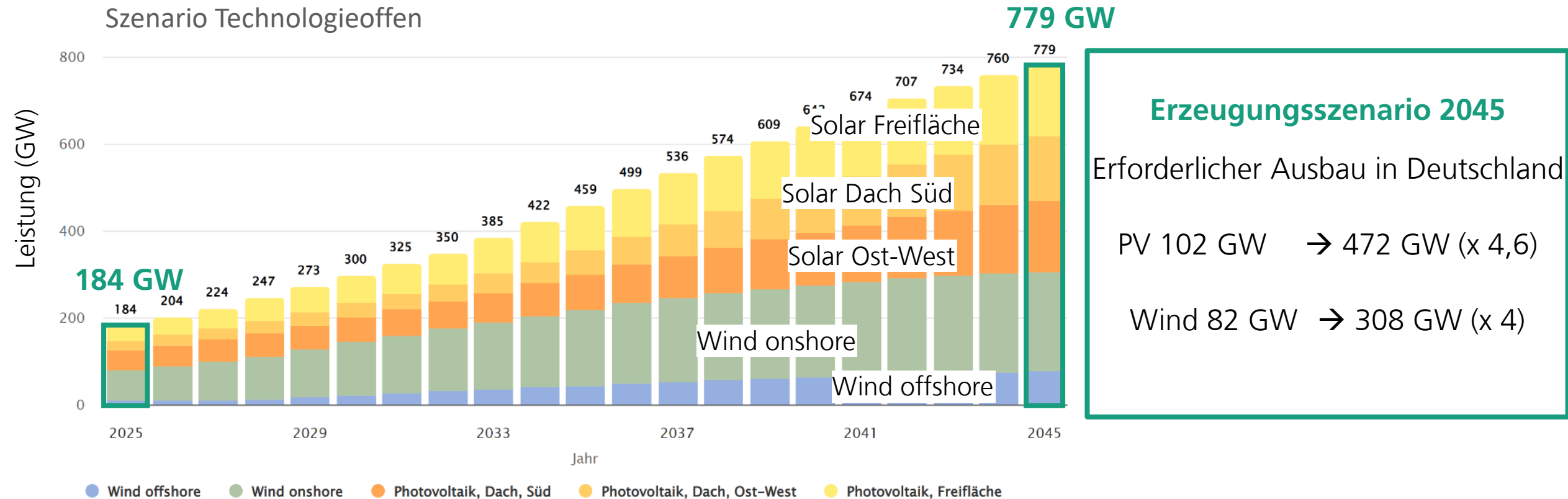
30  
↕  
41

0,61  
↕  
0,41

Quelle: [www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html](http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html)

# Fluktuierende Erzeugung

Ausschnitt aus dem Renewable Energy System Model (REMod Studie 2024)

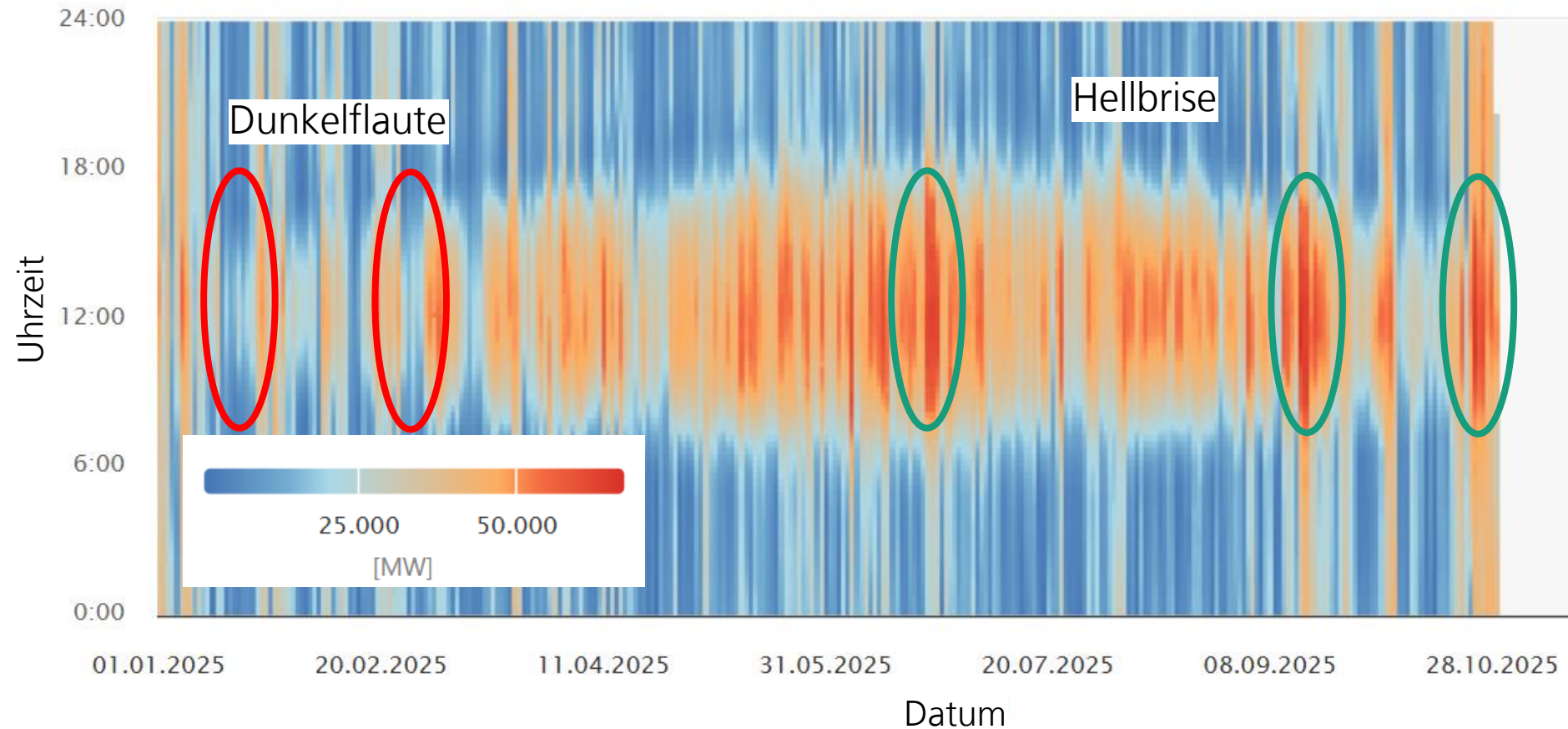


Energy-Charts.info - letztes Update: 14.12.2024, 16:01 MEZ

# Öffentliche Nettostromerzeugung aus Solar und Wind (On- und Offshore)

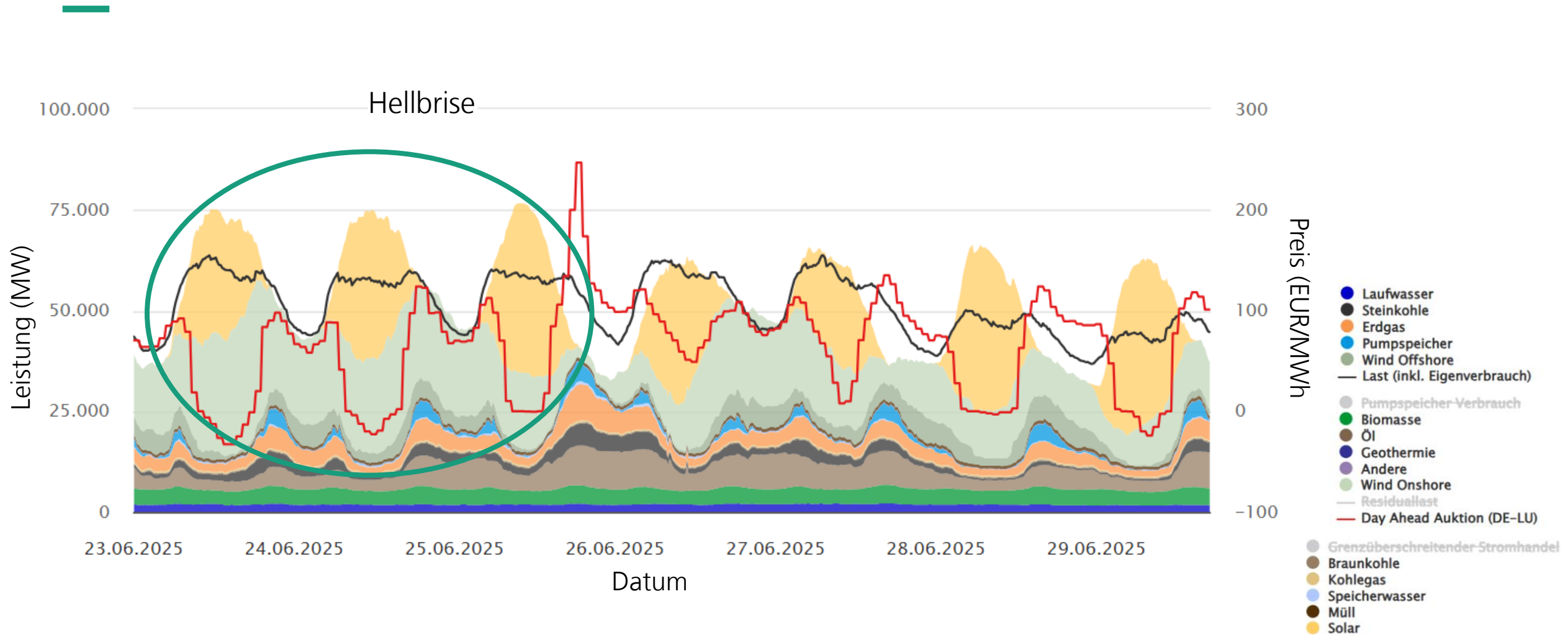
Nettostromerzeugung  
von Kraftwerken zur  
öffentlichen  
Stromversorgung in  
Deutschland.

Dunkelflaute: kaum  
Stromerzeugung durch  
Solar und Wind.  
Gegenteil: Hellbrise.





# Gesamt Nettostromerzeugung in Deutschland



# Negative Day-Ahead Börsenpreise

Stunden im Jahr

Durch die fluktuierenden Börsenpreise entsteht ein Anreiz zum Speicherausbau.



Grafik: L. Probst, Fraunhofer ISE; Daten: EPEX

Wirtschaft > News > Stromspeicher: Wo die Energie aus Wind und Sonne zwischenlagert

## STROMSPEICHER

### Wo die Energie aus Wind und Sonne zwischenlagert



Das Energieunternehmen LEAG nennt diesen Stromspeicher BigBattery, Foto

146

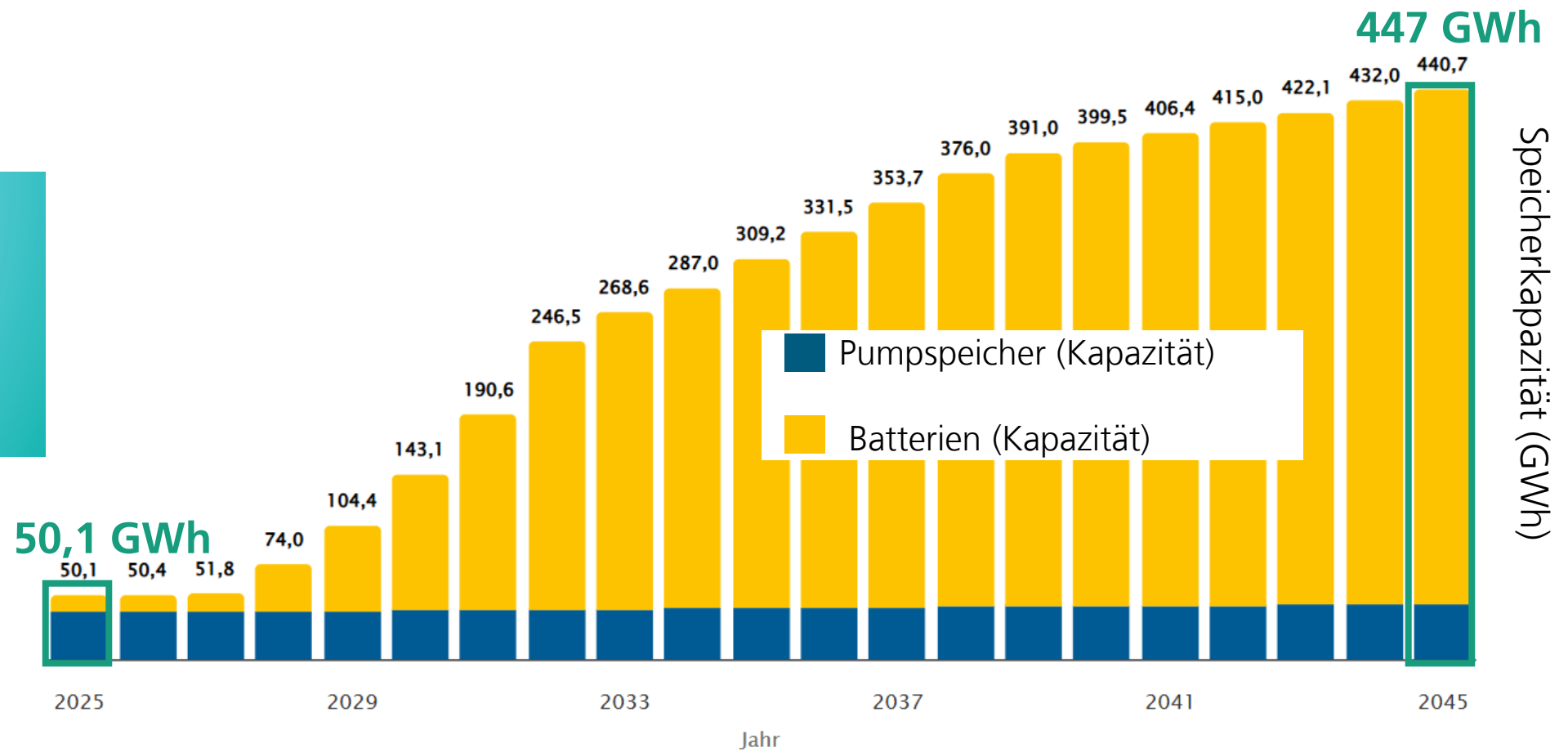
VATTENFALL

Social Media Mediathek Pressekontakt Allgemeine Kontakte Newsroom Karriere

**Flexibilität im Strommarkt ermöglichen: Vattenfall steigt ins Geschäft mit Großbatterien ein**

# Bedarf an installierter Speicherkapazität bis 2045

Energiespeicher sind ein wesentliches Kernelement bei der Energie-Systemtransformation





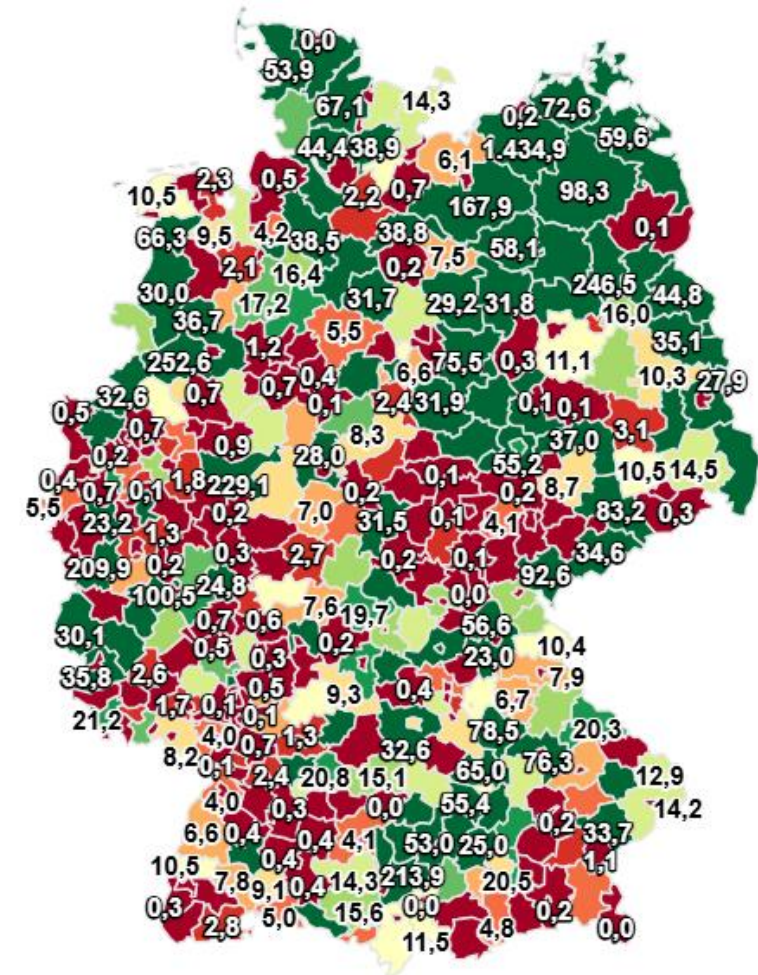
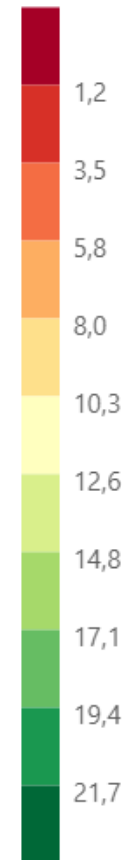
# Geplante Batteriekapazität in Deutschland

- Gesamtkapazität 10,759 MWh

Für Interessierte:

<https://www.energy-charts.info/>

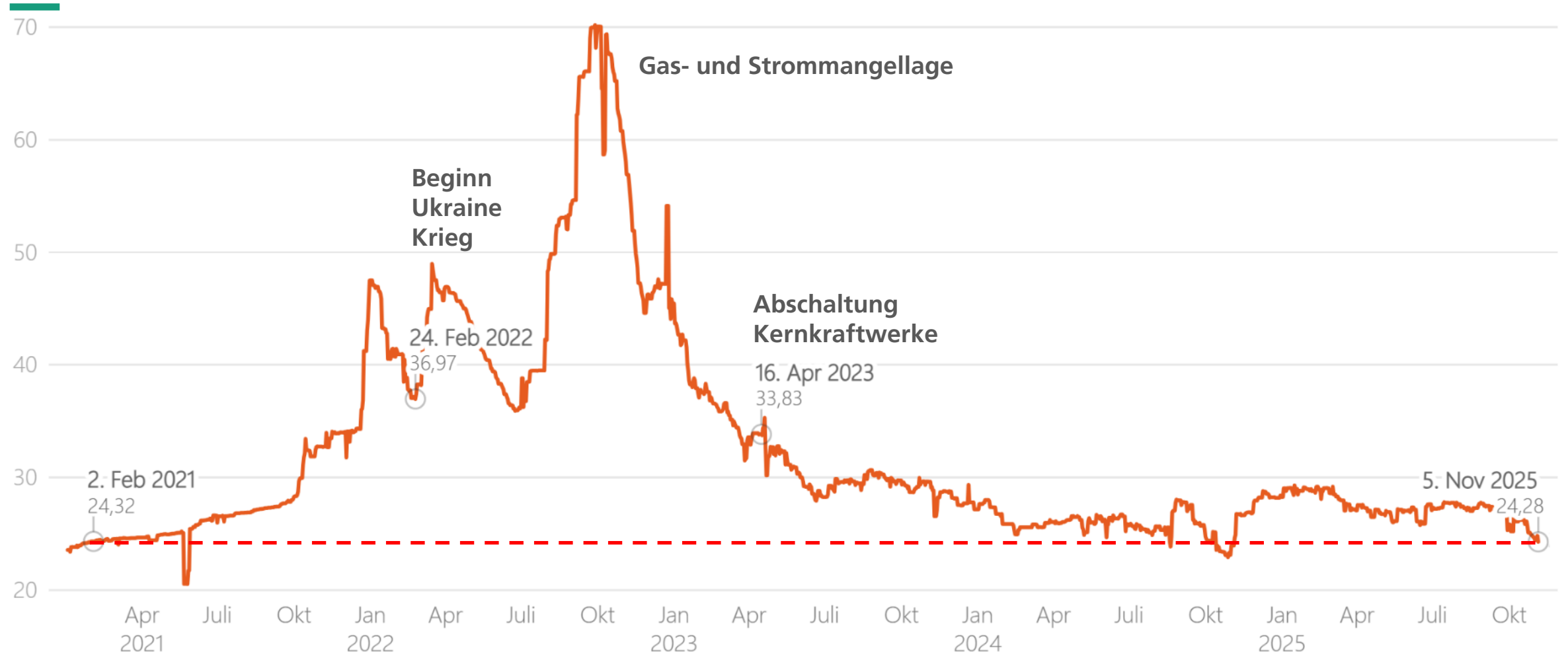
<https://s.fhg.de/energy-charts-talks>



Energy-Charts.info; Letztes Update: 29.10.2025, 08:40 MEZ

# Strompreisentwicklung für Neukunden

Verivox



Quelle: <https://www.verivox.de/strom/strompreise/>

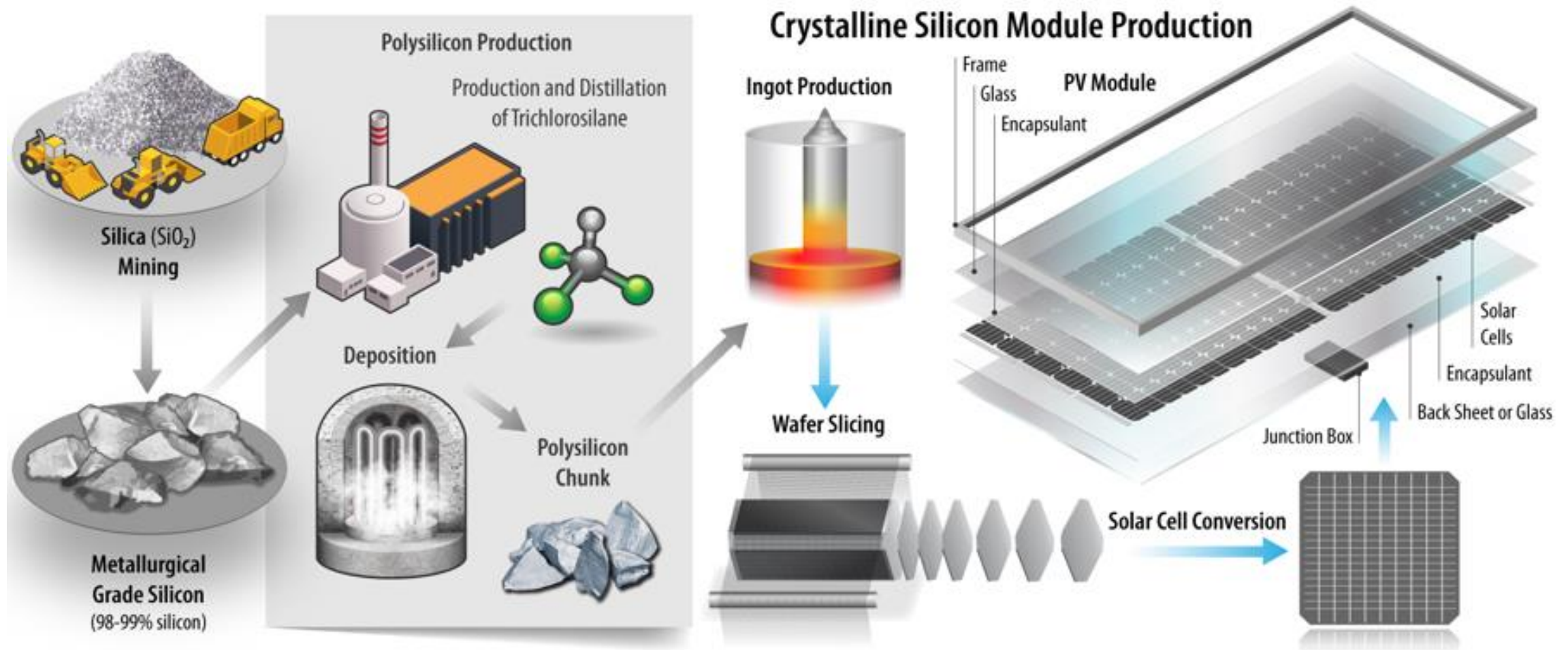
# Agenda

- 1 Das Fraunhofer ISE
- 2 Motivation und Einführung
- 3 Deutsche Energiesystemtransformation
- 4 **Europäische Photovoltaik Industrie**
- 5 Europäische Photovoltaik Forschung
- 6 Zusammenfassung



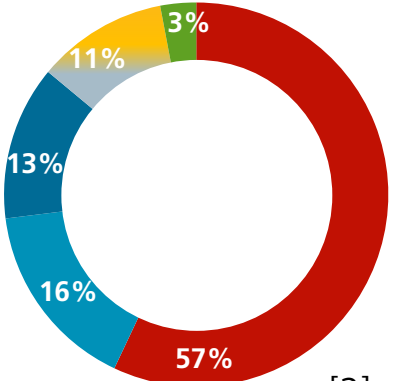
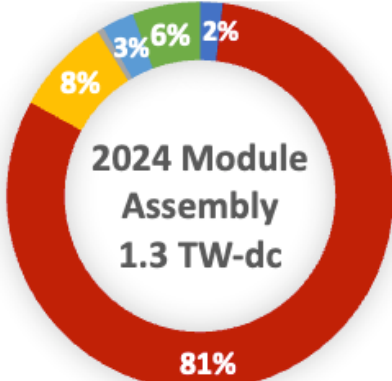
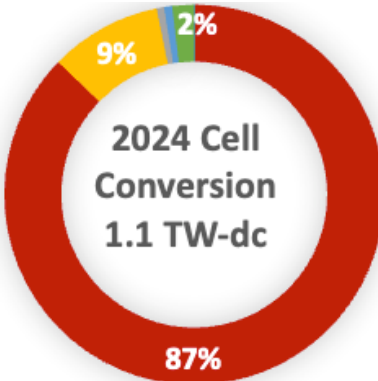
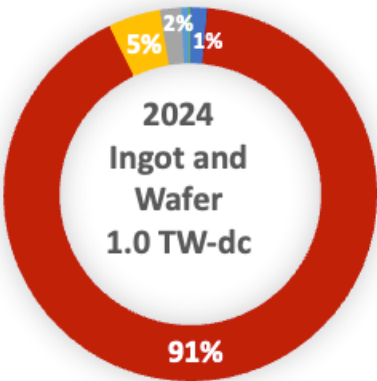
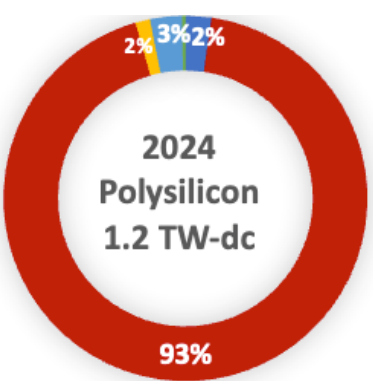
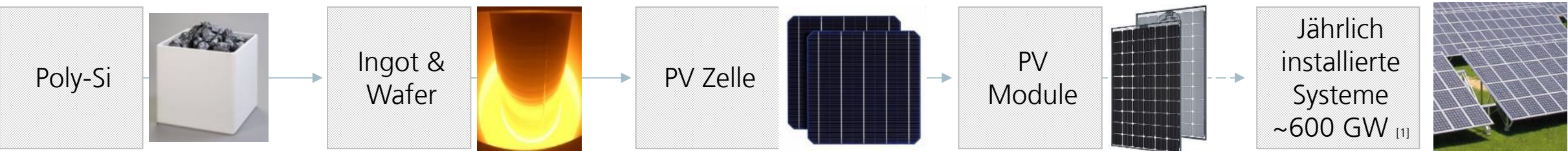


# Die Photovoltaik Wertschöpfungskette aktuell



# Globale Verteilung der Herstellkapazitäten über die Wertschöpfungskette

Monopolstellung China! (Status Q4/2024)



[3] ■ North America ■ Europe ■ ASEAN  
■ China ■ Rest of World ■ South Korea and Japan

# Preisentwicklung für PV-Module

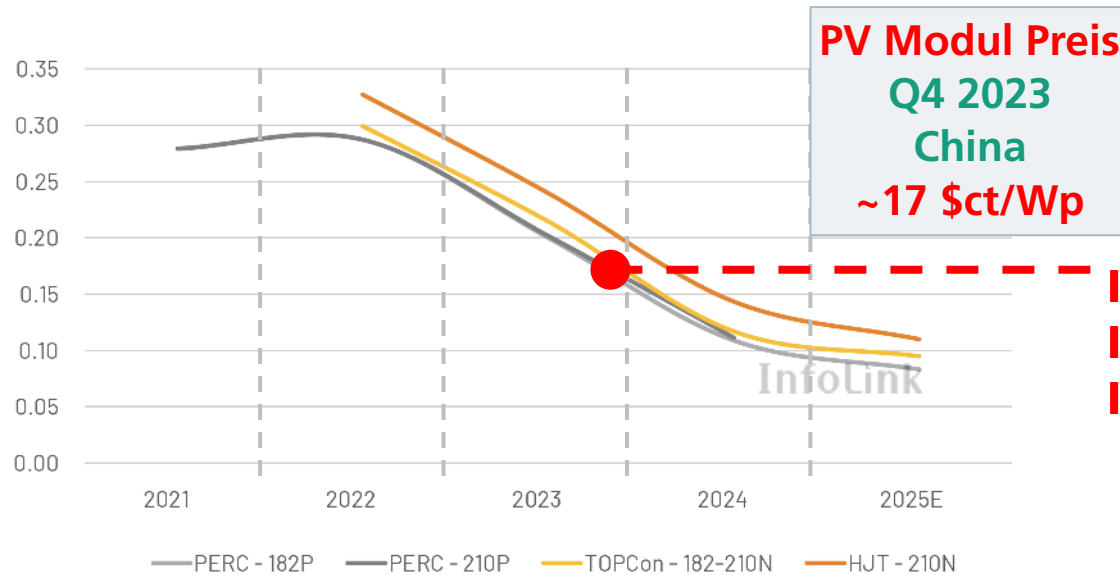
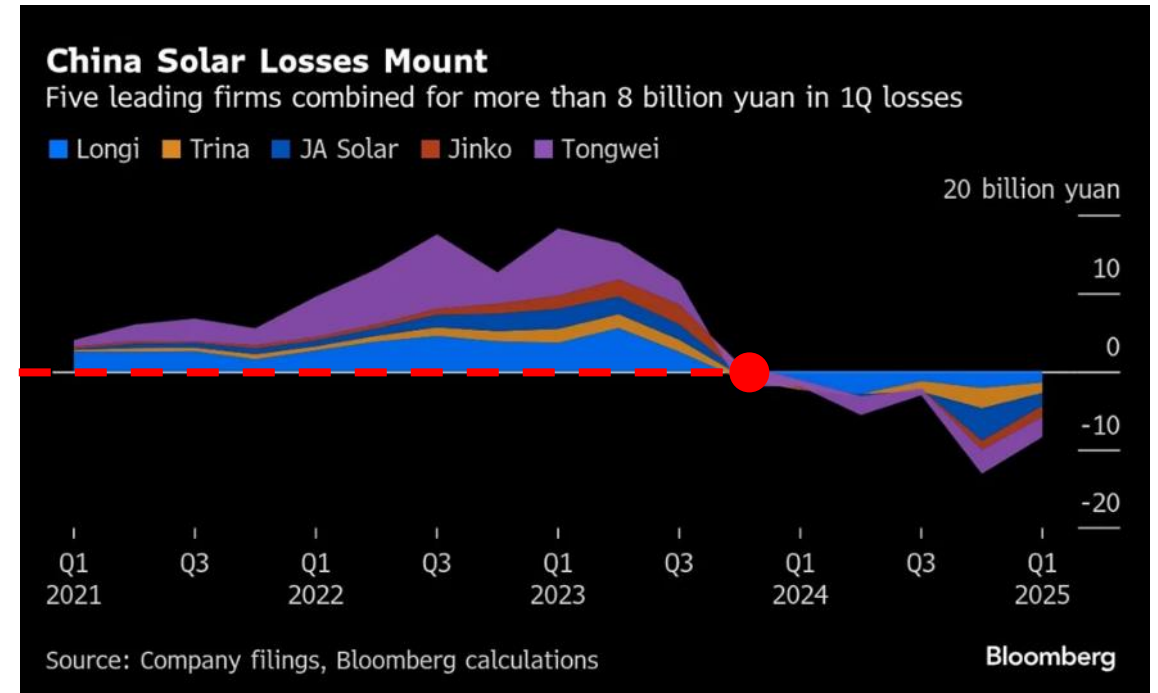


Figure 1.2-21. Module price trends in China<sup>10</sup>, 2021-2025, Unit: USD/W



**Weltweite PV-Überkapazität führt zu PV-Modul Preisen deutlich unter den Produktionskosten**  
**→ hohe Verluste: Die fünf führenden chinesischen PV-Hersteller hatten ca. 1.0 Mrd € Verluste in Q1 2025**



# Durchschnittliche Modulproduktionskosten (NREL/RCT/ISE)

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



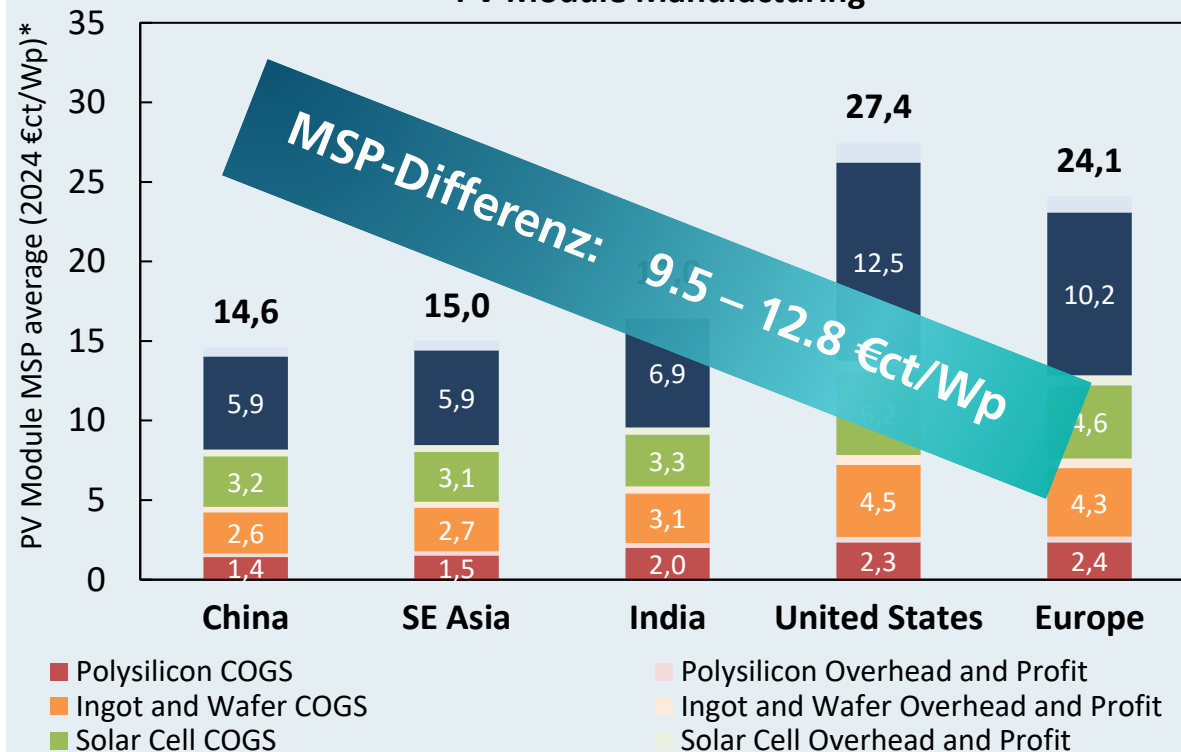
## Sind europäische PV-Module wirklich teurer als asiatische?

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

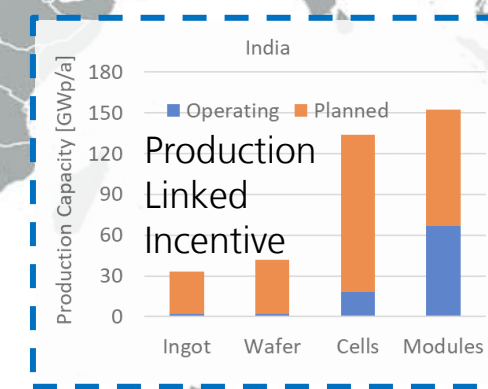
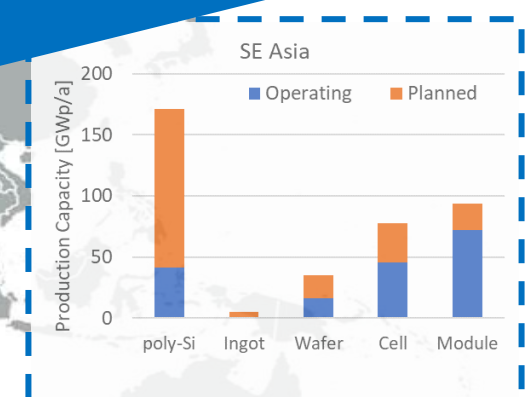
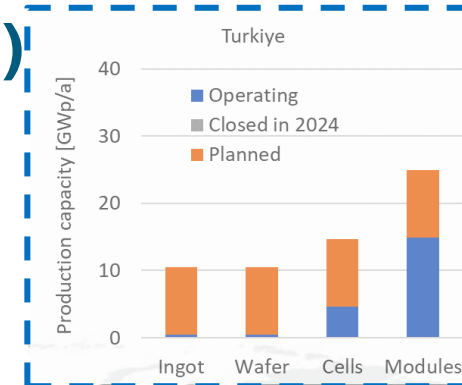
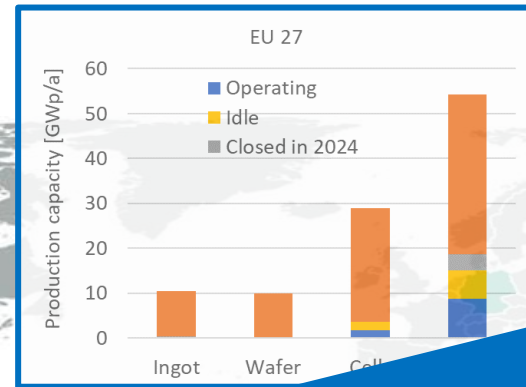
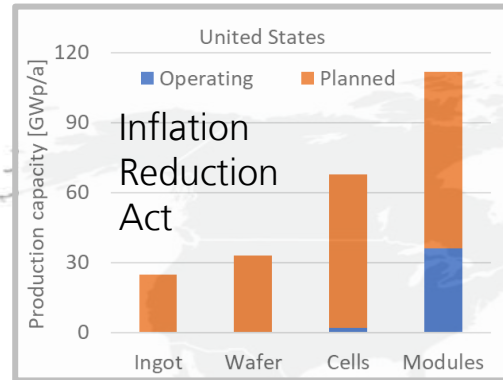
NREL/RCT/ISE Averaged MSP Results for "fully-local" TOPCon PV Module Manufacturing



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

# Globale Kapazitätslandschaft (ohne China)

Laufende und angekündigte Kapazitäten



Exportchancen für den Maschinenbau

■ Operating  
■ Closed in 2024  
■ Planned

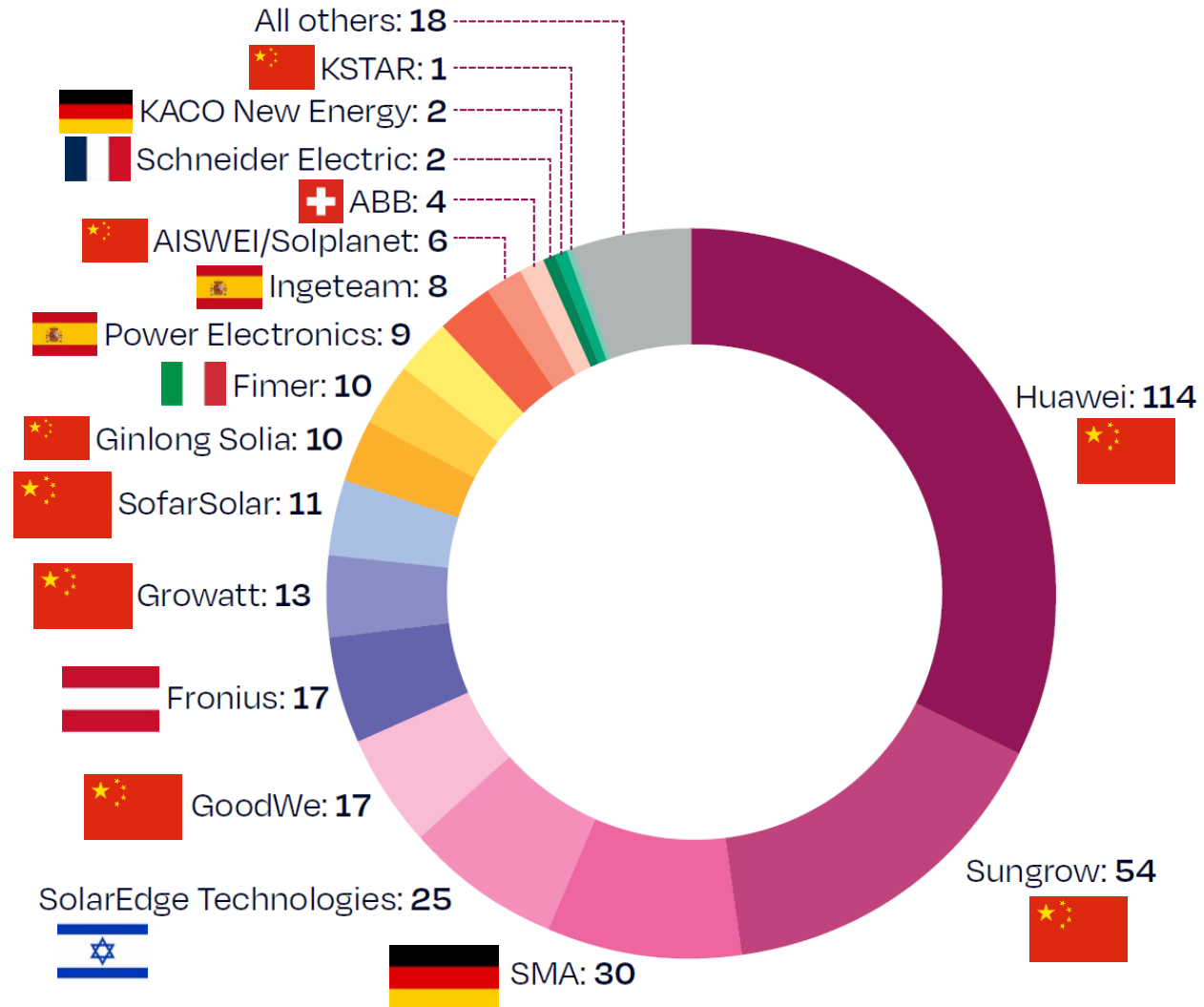
# Marktübersicht PV-Wechselrichter

## China weit vorne

### Wenige große Hersteller dominieren den Markt

- Von 350 GW in der EU installierten Wechselrichtern stammen 226 GW aus China, davon 114 GW von einem einzelnen Hersteller (Zeitraum 2015-2023).
- Mit SMA und Fronius gibt es noch zwei europäische Hersteller oberhalb der 10 GW Marke.

Mit Blick auf kritische Infrastruktur spielt die Cyber-Sicherheit eine wichtige Rolle.



Quelle: "SolarPower Europe (2025): Solutions for PV Cyber Risks to Grid Stability", p.40



# Zwei Kategorien

## Verteilte Anlagen und PV-Kraftwerke



### PV-Dachanlagen, Ladesäulen, Heimspeicher ...

- Meist direkt mit der »Cloud« des Herstellers verbunden und somit potenziell fernsteuerbar
- Gelten nicht als kritische Infrastruktur

**Netz-Risiken:** wenn sehr viele Anlagen gekapert werden Blackout möglich



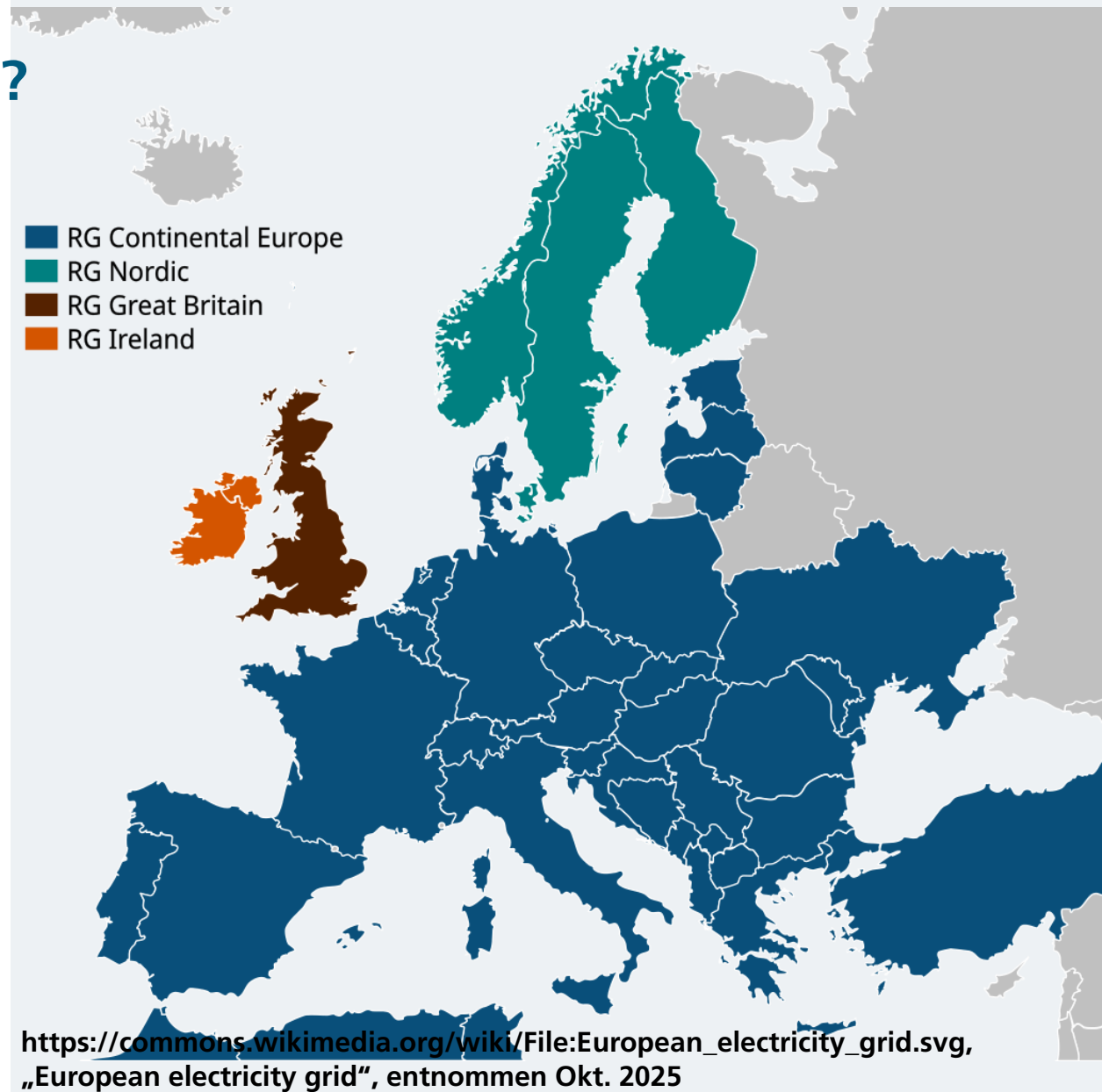
### PV-Kraftwerke

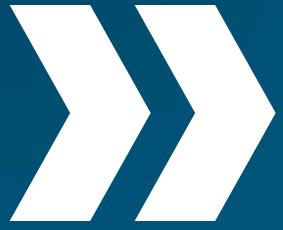
- Hinter SCADA-System / Firewall, nicht direkt an der Hersteller-»Cloud«, oft gibt es Wartungszugänge
- Gelten ab 104 MW als kritische Infrastruktur

**Netz-Risiken:** Hack einiger weniger großer Parks reicht ggf. für Blackout

# Wie viel Gigawatt braucht ein Angreifer?

- 3 Gigawatt Reservekraftwerke sind immer am Netz
- Beim jüngsten Blackout in Spanien verursachten weniger als 3 GW Ausfall einen großflächigen Stromausfall.
- Vermutung: Für einen EU-weiten Blackout durch einfachere Angriffsarten müssten mindestens 10 GW kontrolliert werden
- weitere F&E notwendig



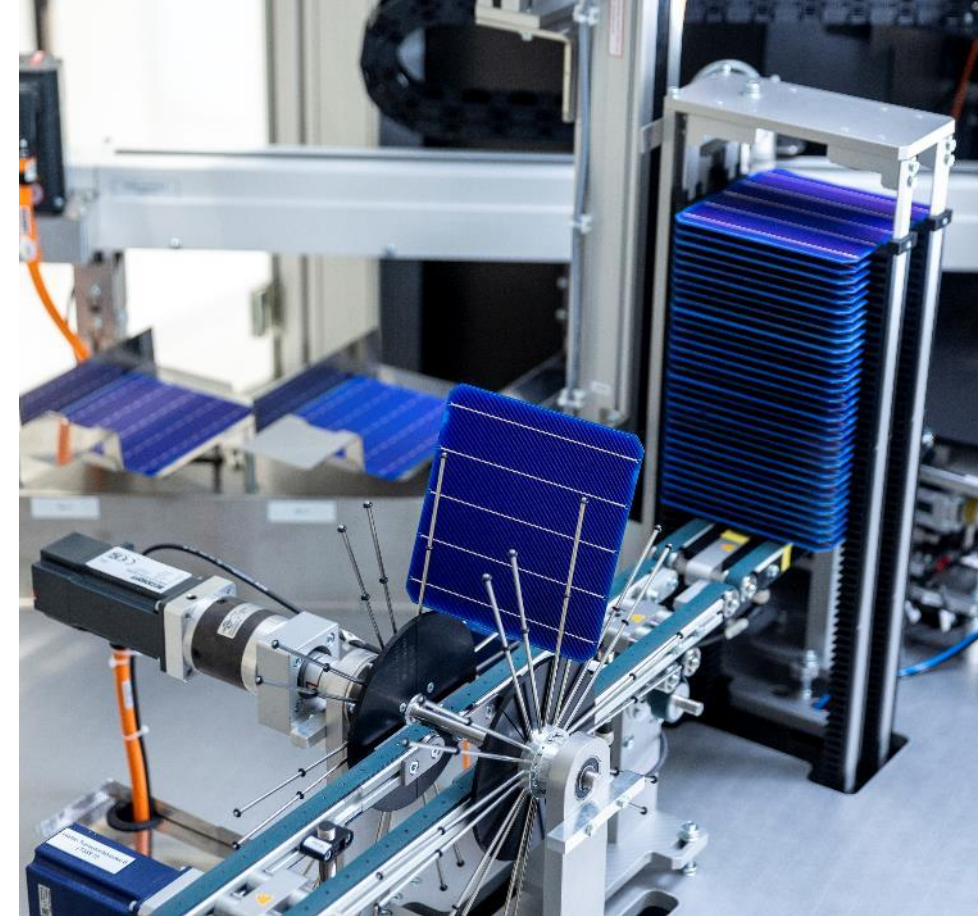


**Wir gefährden unsere sichere  
Energieversorgung, wenn wir von China  
abhängig bleiben bzw. werden.**



# Agenda

- 1 Das Fraunhofer ISE
- 2 Motivation und Einführung
- 3 Deutsche Energiesystemtransformation
- 4 Europäische Photovoltaik Industrie
- 5 Europäische Photovoltaik Forschung**
- 6 Zusammenfassung



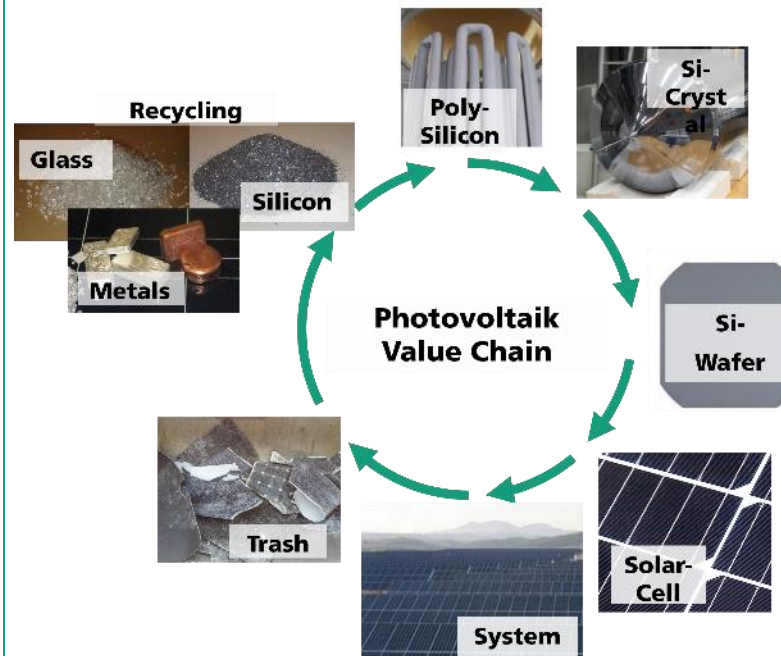
# Herausforderungen und Chancen für Europa

Für den globalen PV-Ausbau wird eine große Menge an Ressourcen benötigt. Europa sollte als Innovationstreiber Verantwortung übernehmen.

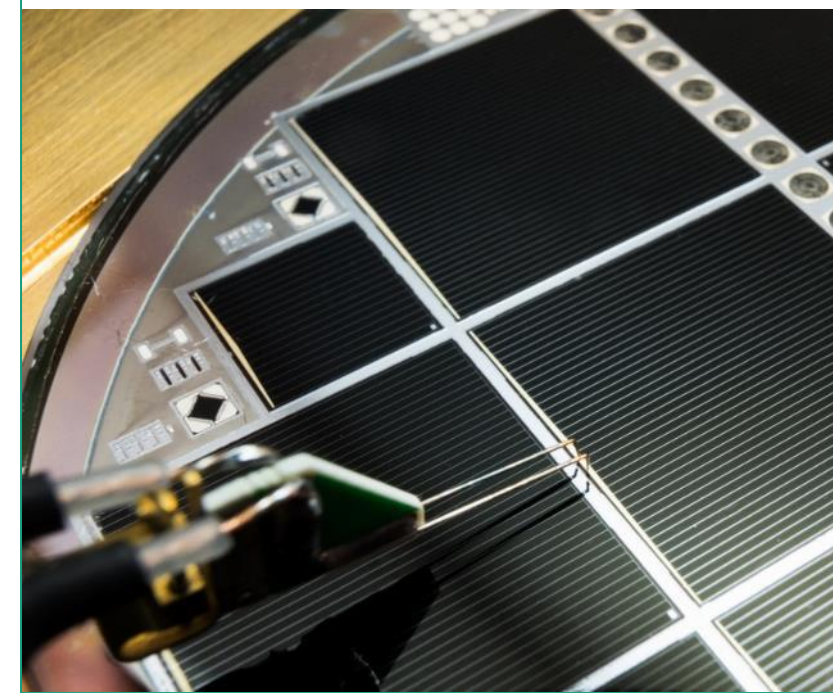
→ ~ 300 000 km<sup>2</sup> Fläche  
→ ~ 3 000 000 000 Tonnen an Materialien: Glas, Silizium, Aluminium, Silber, Polymere ...

Wie kann diesem Verbrauch begegnet werden?

1. Nachhaltige Produktion, Si-Modul-Recycling und Zirkularität sind notwendig!



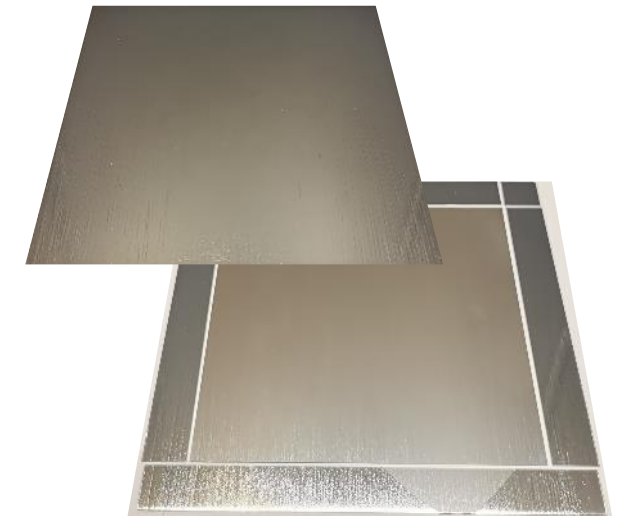
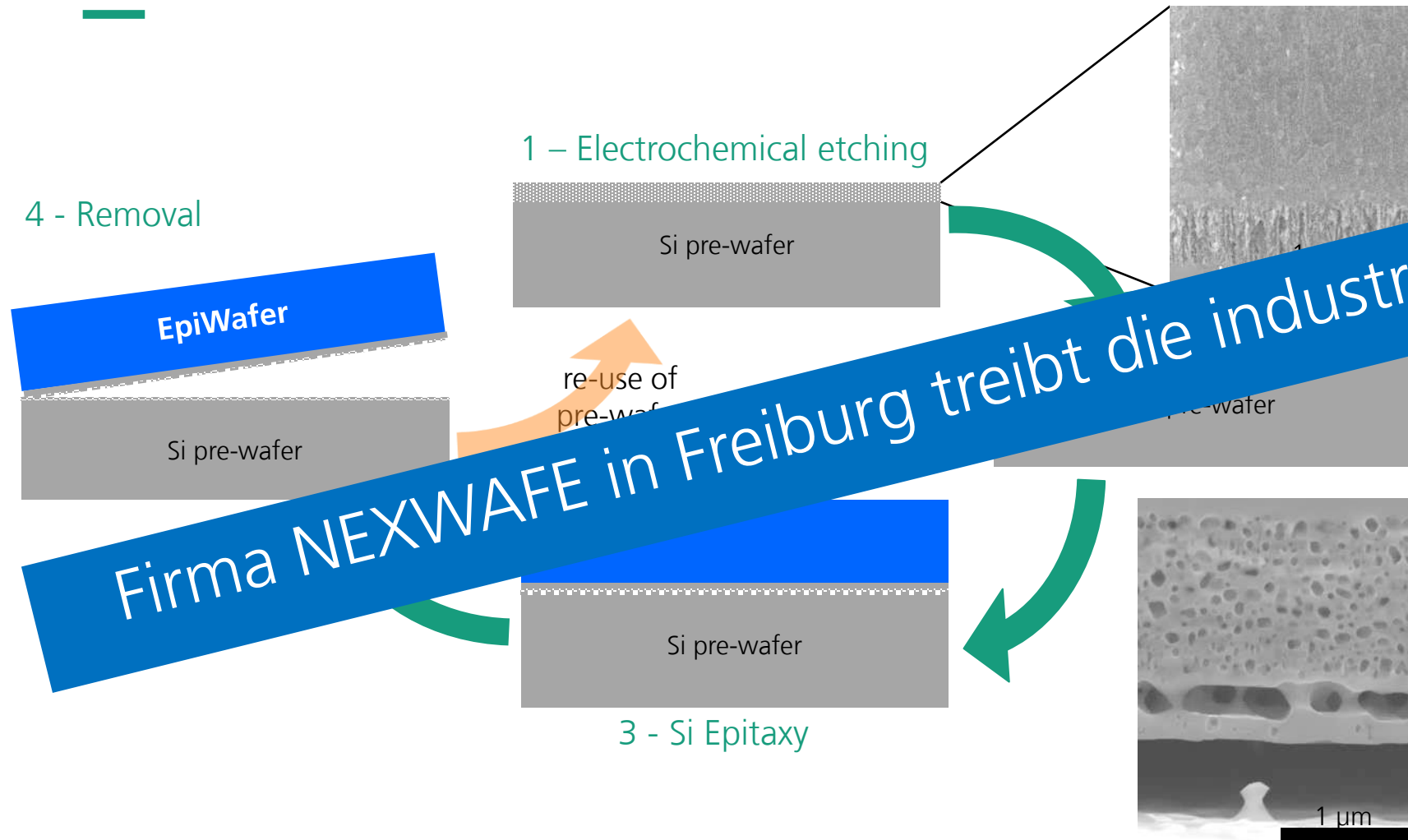
2. Höchste Effizienzen sind essenziell  
→ weniger Material!





# Disruptive Waferproduktion: der EPIWafer!

Spart Energiekosten und verringert aktuell den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck



# PV-Modul Recycling

## Circular Economy

Herausforderung als Chance  
→ Produkte als Ressourcenspeicher  
→ Materialien im Kreislaufführen  
→ Upcycling

- Ansatz für das Recycling von PV-Modulen am ISE-CSP: Kombination aus mechanischer Sortierung und nasschemischem Ätzen von vorzerkleinerten Modulen
    - 15,6 t Materialbehandlung
    - 627 kg Zell-Teile wurden nass-chemisch geätzt
    - 547 kg de-metallisiertes Si und 6,18 kg Silber zurückgewonnen
- 1 Cz-Crystal (44 kg), 1 G1 VGF-Crystal (15 kg), 1 G2 VGF-Crystal (60 kg) grown out of 100 % recycled silicon



Ausgangsmaterial



Glas



Silber und Kupfer



Silizium



# PV-Modul Recycling



**PERC-Zellen aus 100 %  
recyceltem Material:**  
Zell-Effizienz 19,7 %  
wurden schon nach dem  
ersten Versuch erzielt!

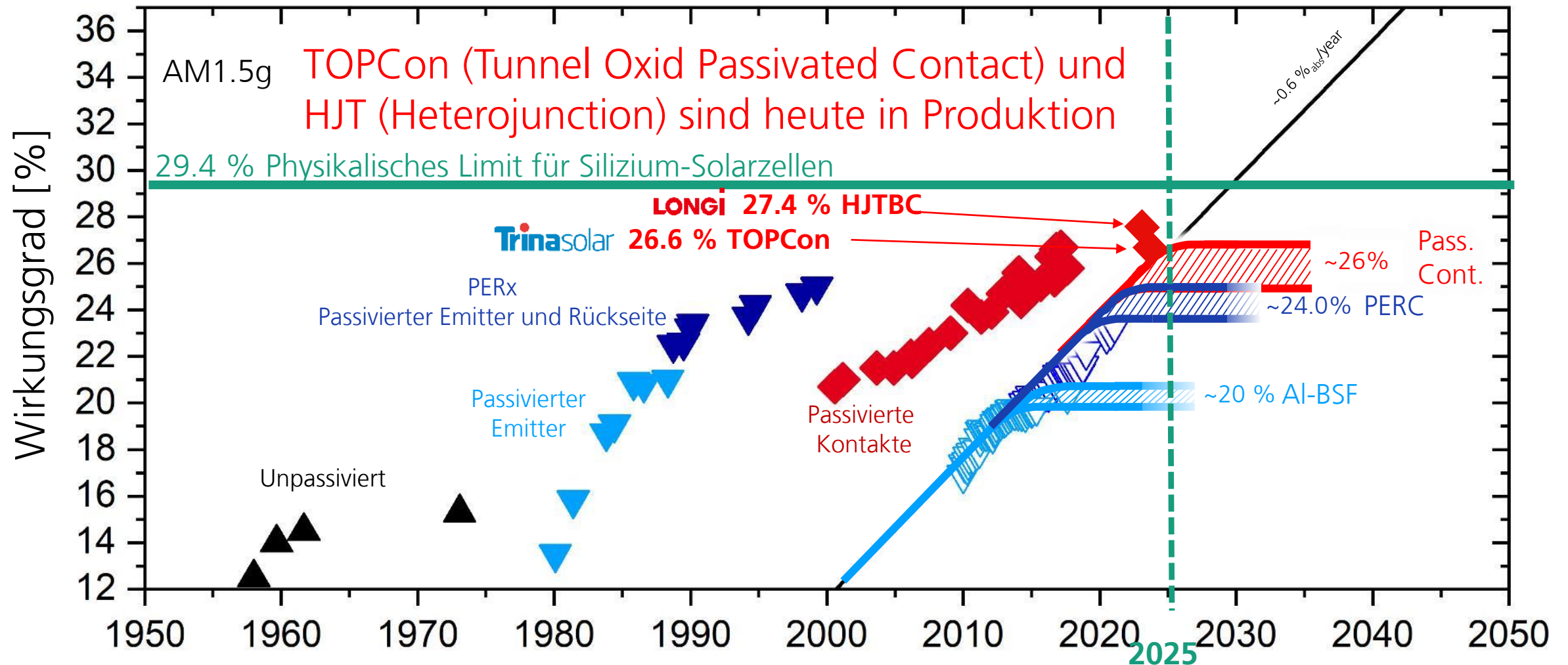
Demonstrator aus PERC-  
Zellen aus recyceltem  
Silizium, installiert auf dem  
Fraunhofer-Testfeld.



→ Es gibt noch viel Raum für Verbesserungen – aber wir haben gezeigt, dass es möglich ist!

# Wirkungsgrade von Solarzellen - Geschichte und aktueller Stand

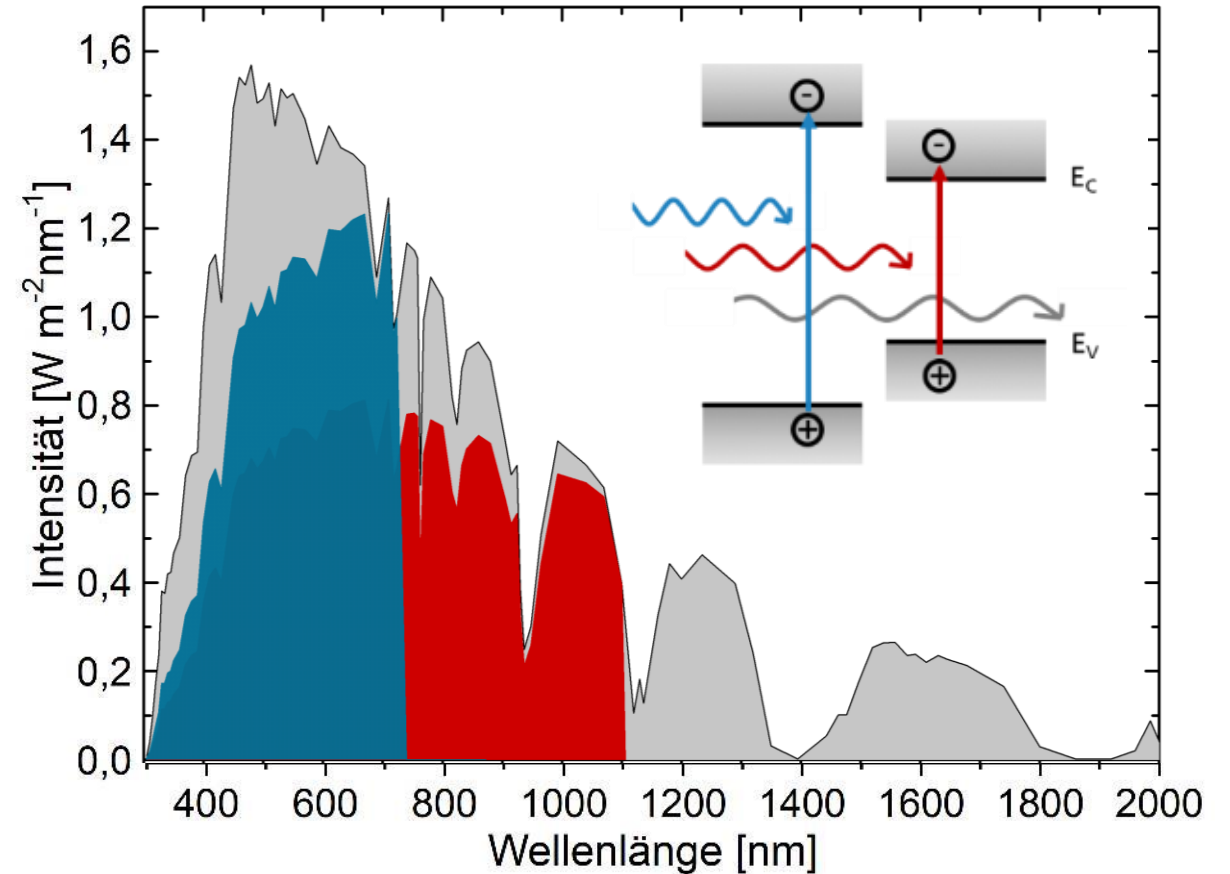
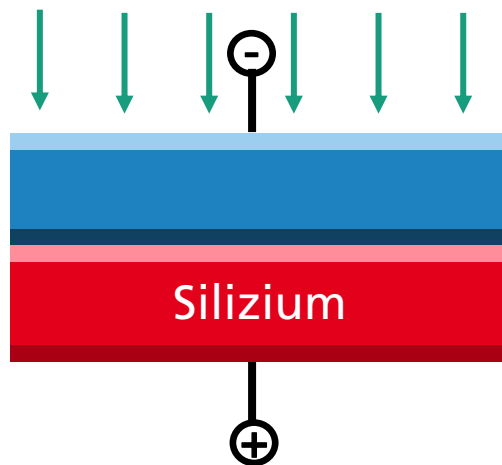
Labor-Rekorde (Symbole) und industrielle Produktionswerte (Linie)



# Das physikalische Limit von Silizium-Solarzellen überschreiten

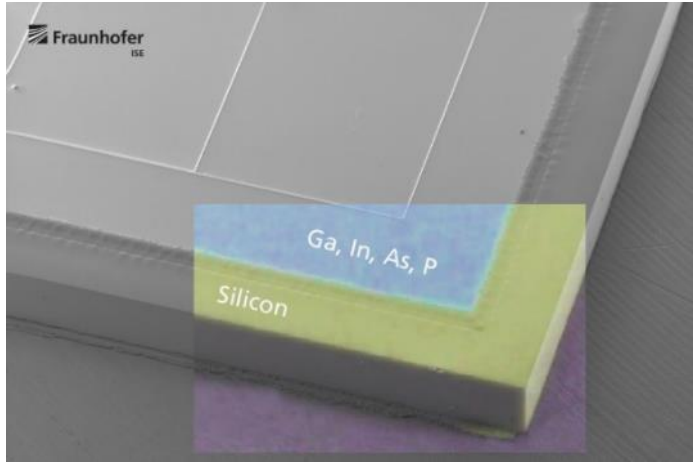
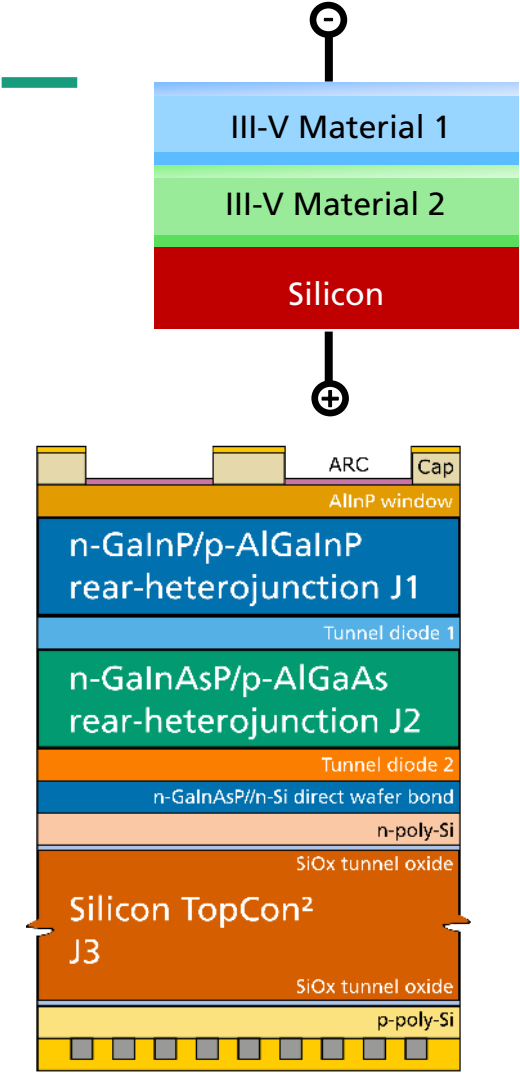
## Tandem-Solarzelle

- 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

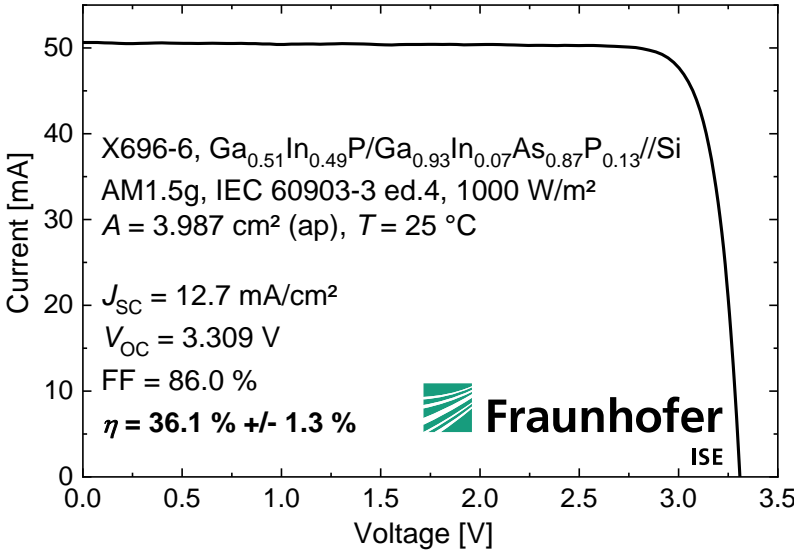
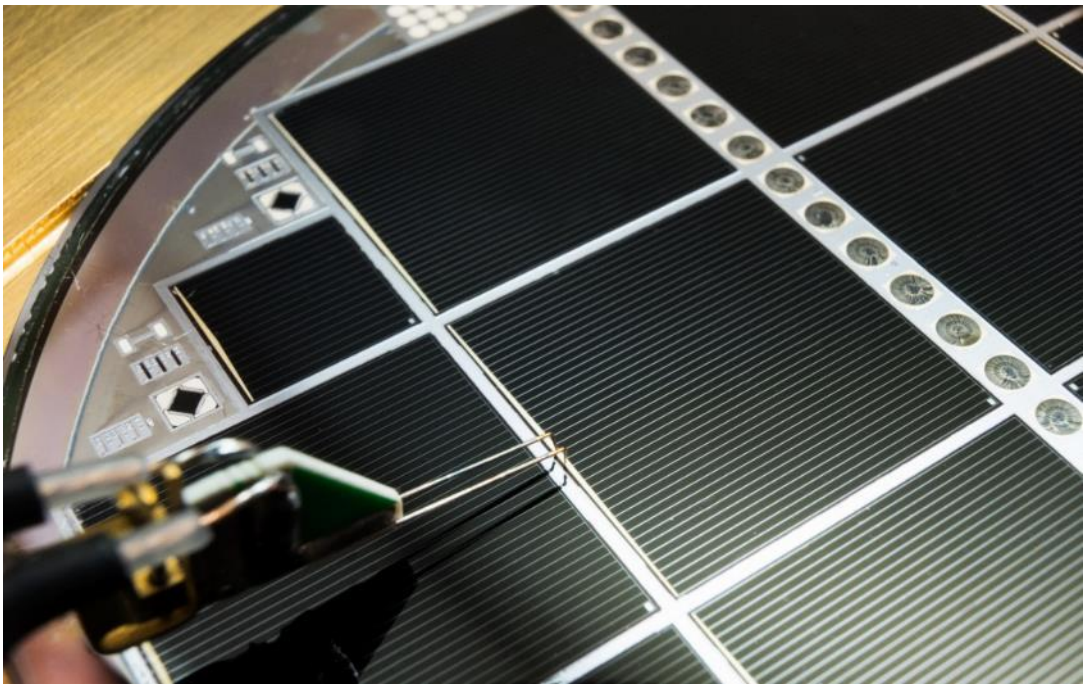




# III-V//Silizium Tandem Zellen



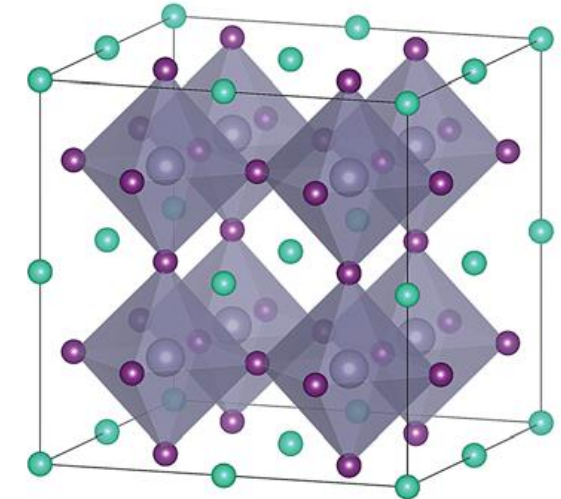
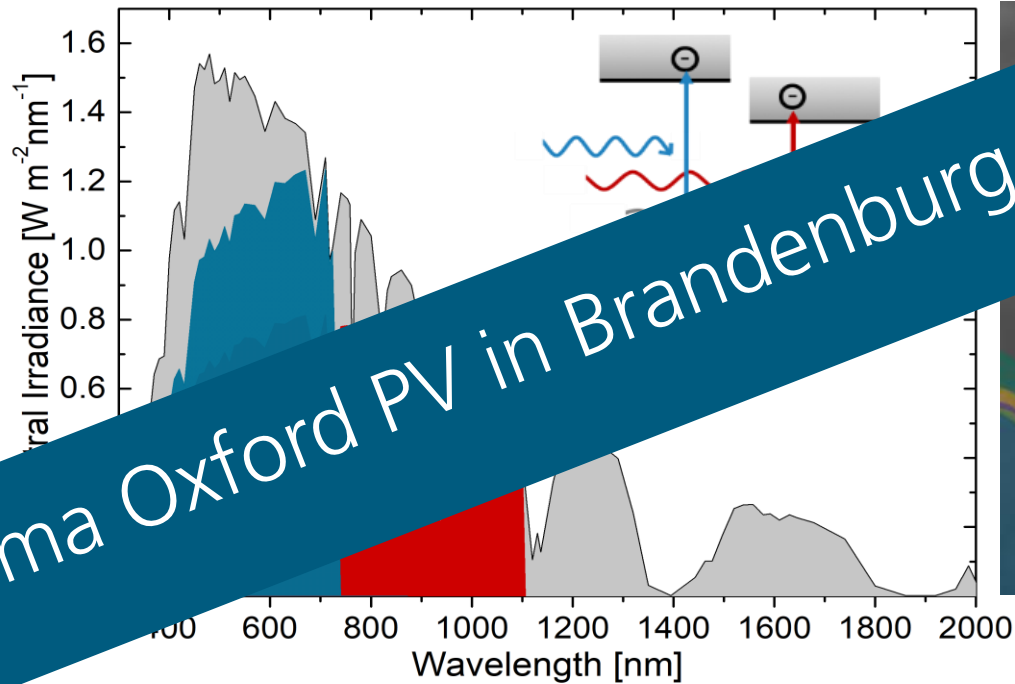
**36,1% (AM1,5g)**  
Rekord für monolithische  
Tandemzellen auf Siliziumbasis





# Perowskit-Silizium Tandem

Sehr dünne Schichten auf Silizium!  
Langzeitstabilität ist eine aktuelle Herausforderung

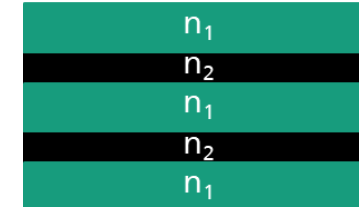
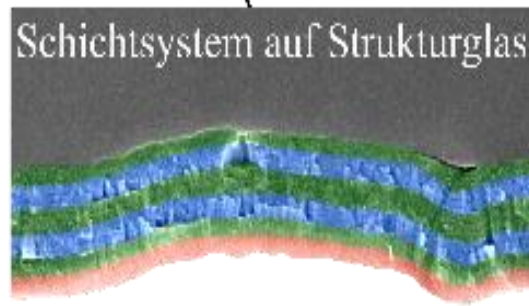


Perowskit - Kristallstruktur

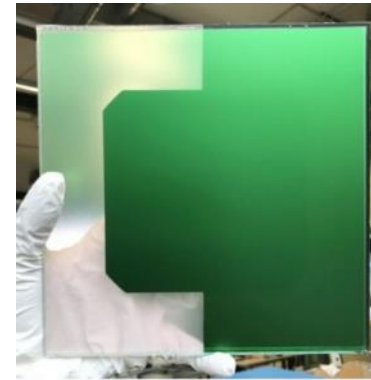
# Fassadenintegration

Integration in vorhandene Flächen

- Solarzellen sind nicht mehr sichtbar!
- patentierte Technologie



MorphoColor





# Ursprung der Agri-PV und Erfolgsgeschichte

Frankreich ist Vorreiter in Europa. Es gibt seit 2017 ein staatliches Förderprogramm. Geplant sind 15 MWp Ausbau/Jahr.

Deutschland holt auf. Ab diesem Jahr ist die Agri-PV Teil des Erneuerbaren-Energie-Gesetzes. Das geschätzte Potenzial für Deutschland liegt bei ca. 1700 GWp.

Die Idee

**1981** die Agri-Photovoltaik Idee von Prof. Goetzberger and Zastrow



Prof. Adolf Goetzberger

Stand heute

**2021** global installierte Agri-PV Kapazität min. 14 GWp



Agri-PV-Anlage, bestehend aus zwei Teilanlagen und eine Kontrollfläche von der Luft

# Agri-Photovoltaik

## Landnutzungs-Effizienz

- Doppelnutzung
- Vorteile für für einige Pflanzenarten



**100 % Kartoffeln and 100 % Solarenergie**



**103 % Kartoffeln und 83 % Solarenergie  
→ 186 % Landnutzungs-Effizienz**





# Agenda

1

Das Fraunhofer ISE

2

Motivation und Einführung

3

Deutsche Energiesystemtransformation

4

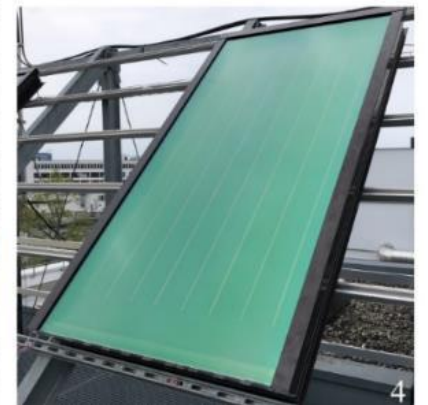
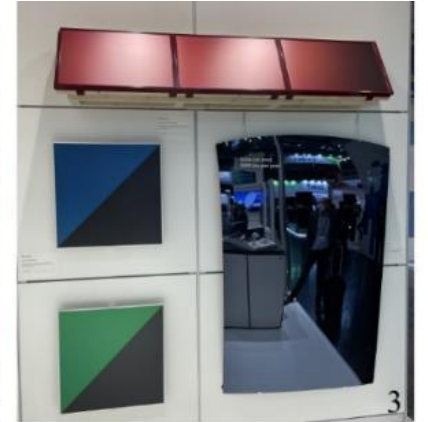
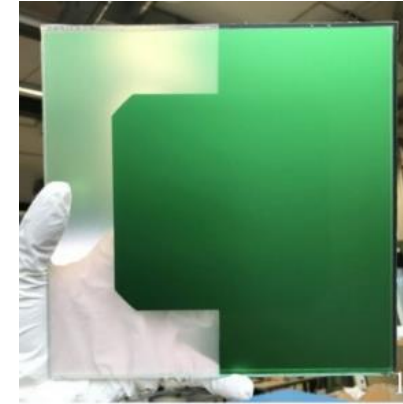
Europäische Photovoltaik Industrie

5

Europäische Photovoltaik Forschung

6

**Zusammenfassung**



# Zusammenfassung

- 1** Die gute Nachricht: Die Energiewende in Deutschland schreitet voran! Dunkelflaute und Hellbrise sind Herausforderungen – aber lösbar!
- 2** Photovoltaik ist weltweit eine tragende Säule der Energiesystem-Transformation hin zu resilienten und nachhaltigen Energiesystemen.
- 3** Die Photovoltaik-Produktion entlang der gesamten Wertschöpfungskette findet heute zum größten Teil in Asien statt – es existiert eine große Abhängigkeit.
- 4** Innovationen im Bereich der Photovoltaik-Produktion sind in D und EU in den Laboren vorhanden.

# 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)

