

Energiewende – Chancen und Risiken

Anlass: Vortrag für die Museums-
und Lesegesellschaft

Referent: Prof. Andreas Bett

10. November 2025

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

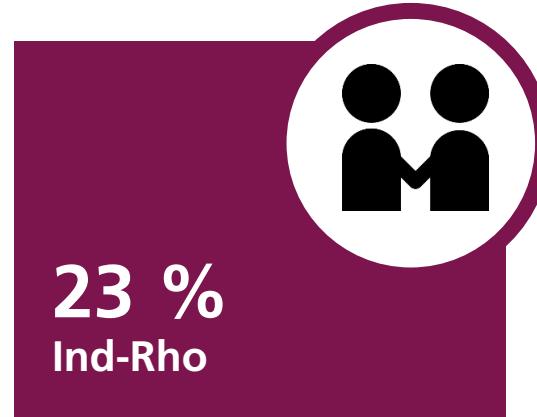
- PV – Materialien, Zellen, Module
- PV – Produktionstechnologie und Transfer
- Klimaneutrale Wärme und Gebäude
- Solarkraftwerke und Integrierte PV
- Leistungselektronik und Stromnetze
- Elektrische Energiespeicher
- Wasserstofftechnologien
- Systemintegration



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 zuviel

Treibhausgase

CO₂-Konzentration in der Atmosphäre steigt so hoch wie nie seit 1957

Die CO₂-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 CO₂-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 CO₂ in der Atmosphäre lag 2024 insgesamt bei 423,9 ppm.

1950



No data

0

1 million

3 million

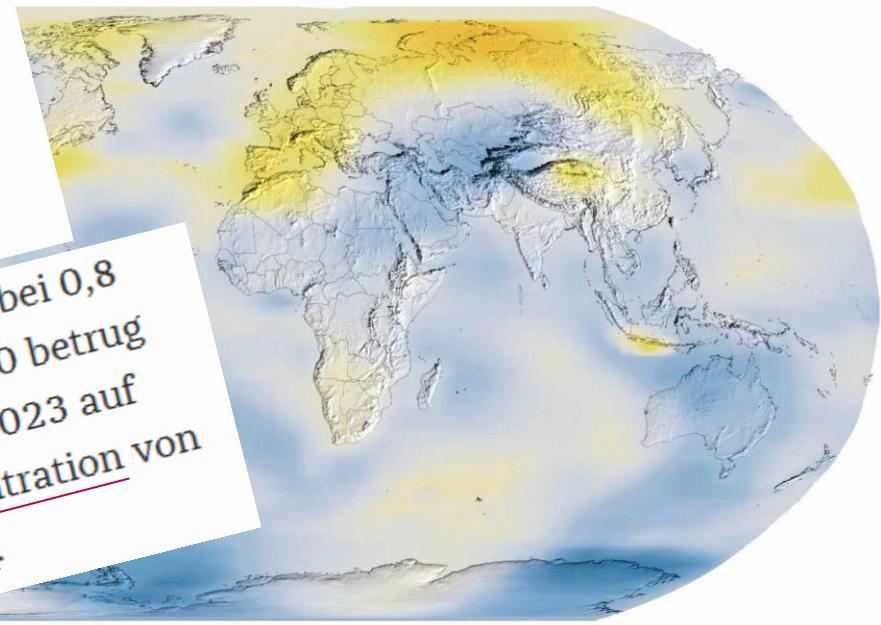
6

©Fraunhofer ISE
public

Thanks to Christof Haas, <https://www.gfz-potsdam.de/>

DIE ZEIT

Änderung des Klimas, extreme Wetterereignisse



-2.2 -1.1 0 1.1 2.2 °C

<https://www.nasa.gov/>
<https://ourworldindata.org/>

Ein Fusionsreaktor weit entfernt liefert Energie für die Welt!



Abstand zur Erde: 149,6 Mio km

Sichtwinkel: 0.54°

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

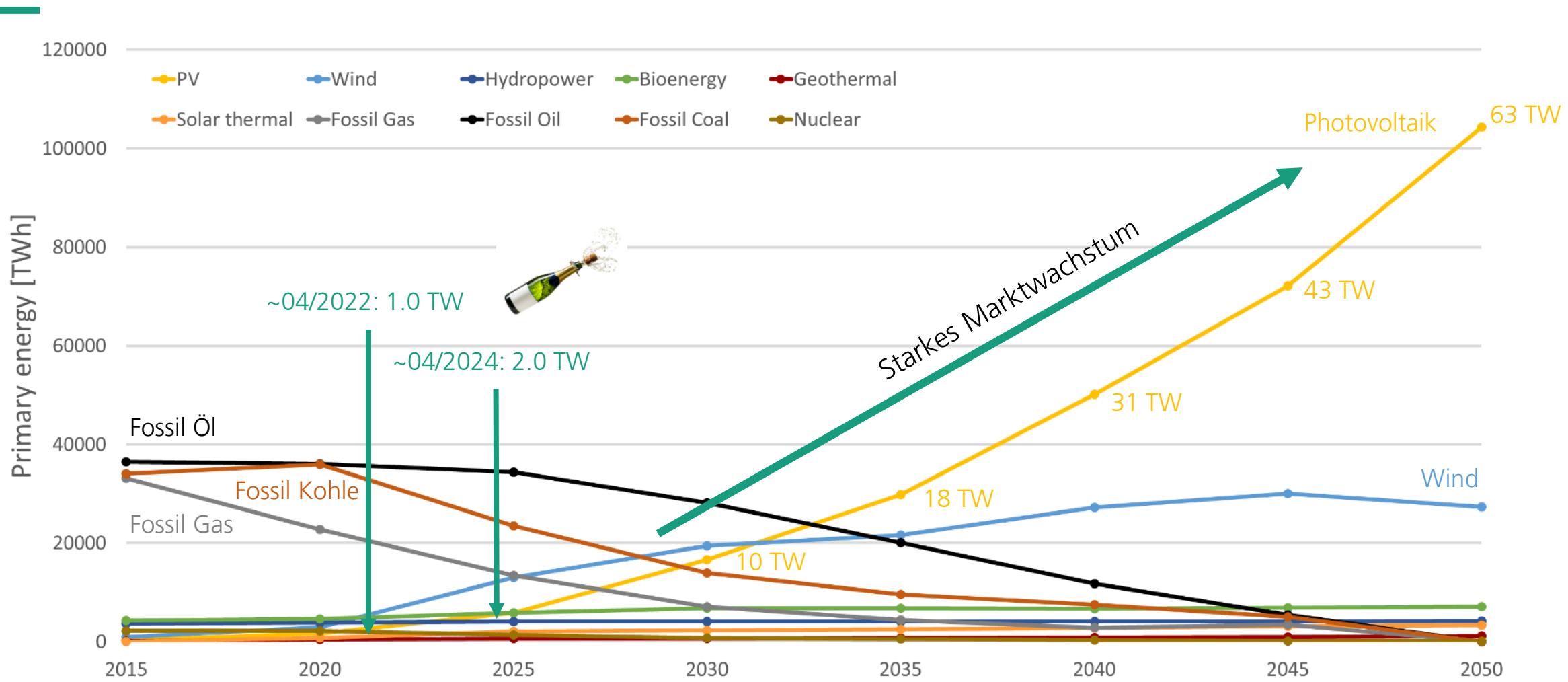
Schwarzkörperstrahlung: 5778 K

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

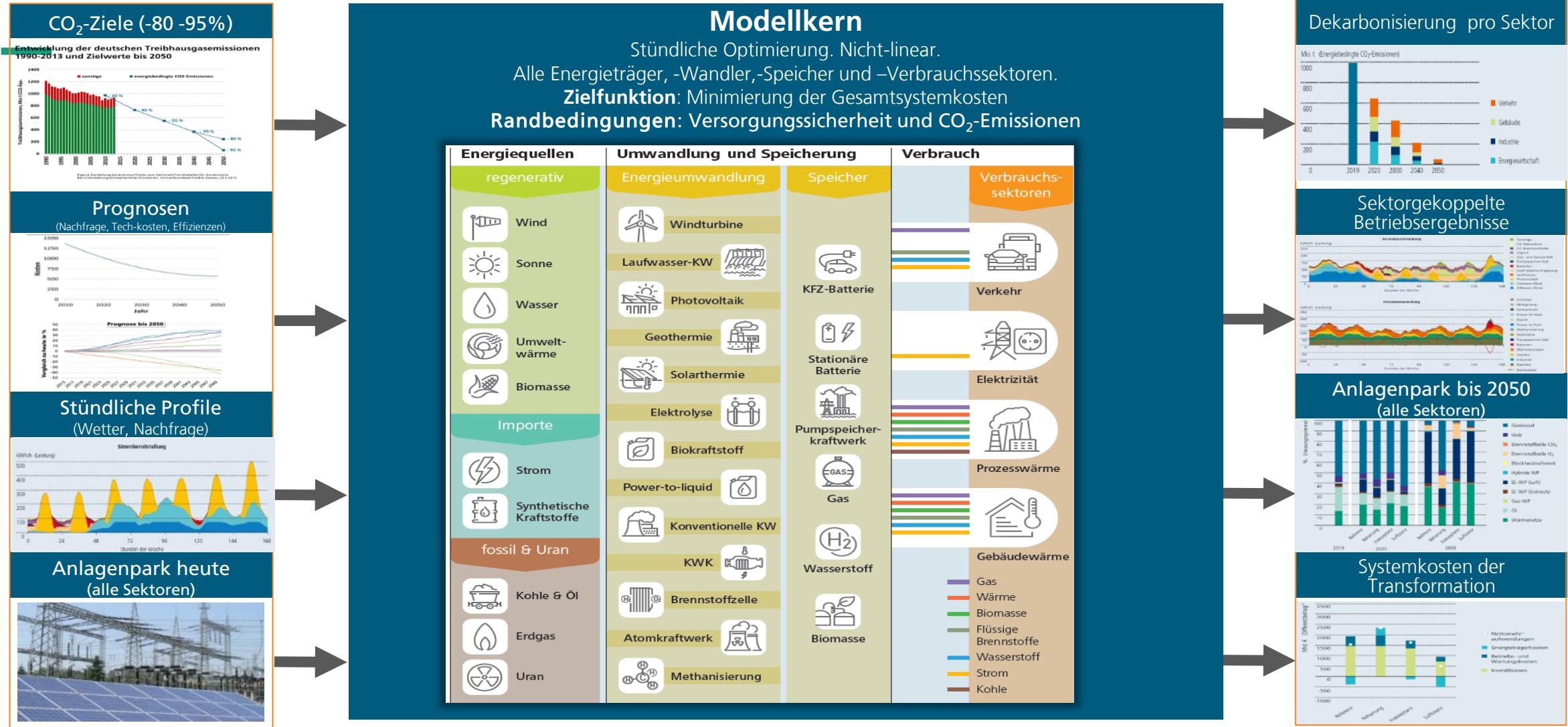


Globalen Energieversorgung auf dem Weg zur Pariser-Klimazielerreichung

Markt: Photovoltaik wird in großen Mengen benötigt!

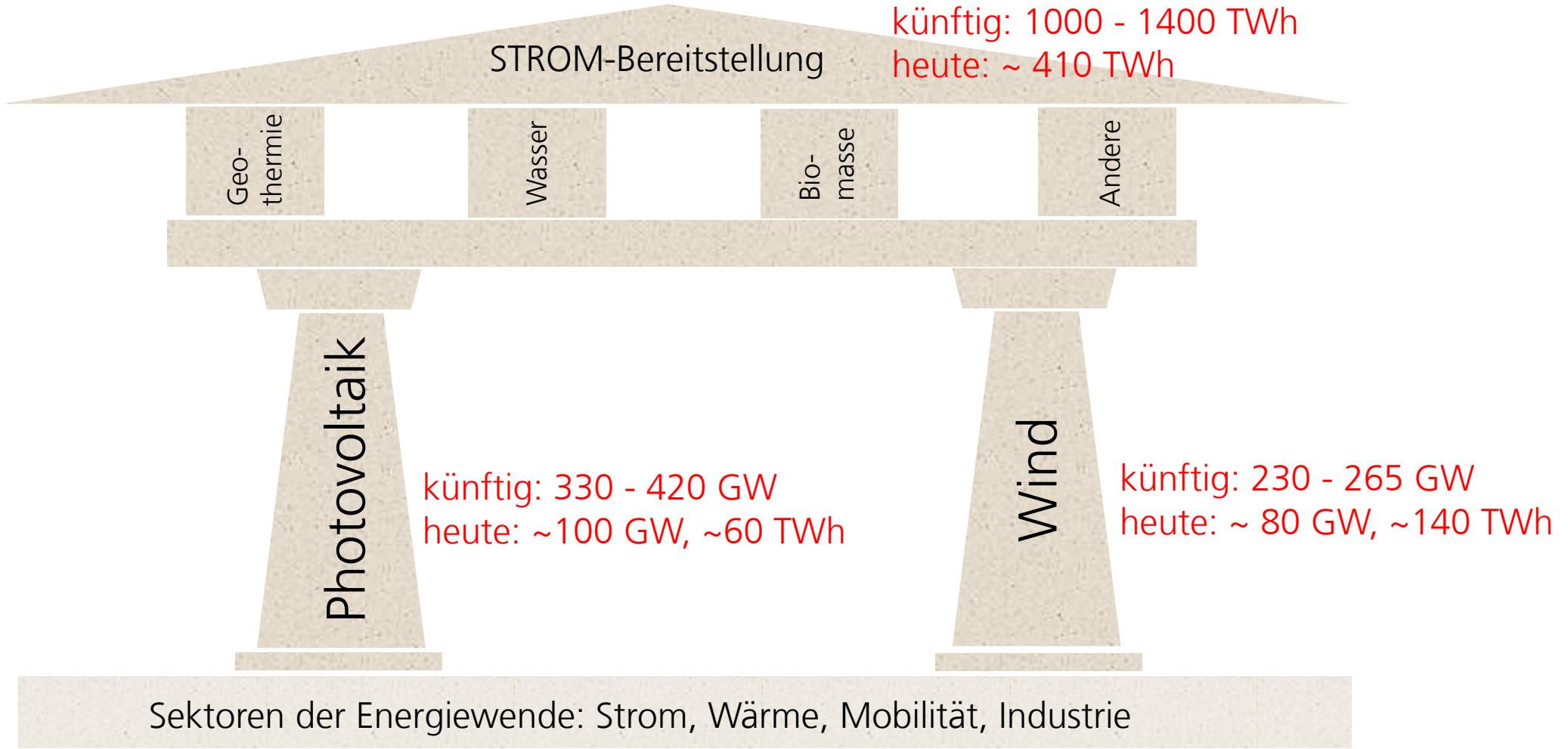


REMod – Sektorenübergreifendes Energiesystemmodell



Das Gebäude der Energiewende

Werte für Deutschland

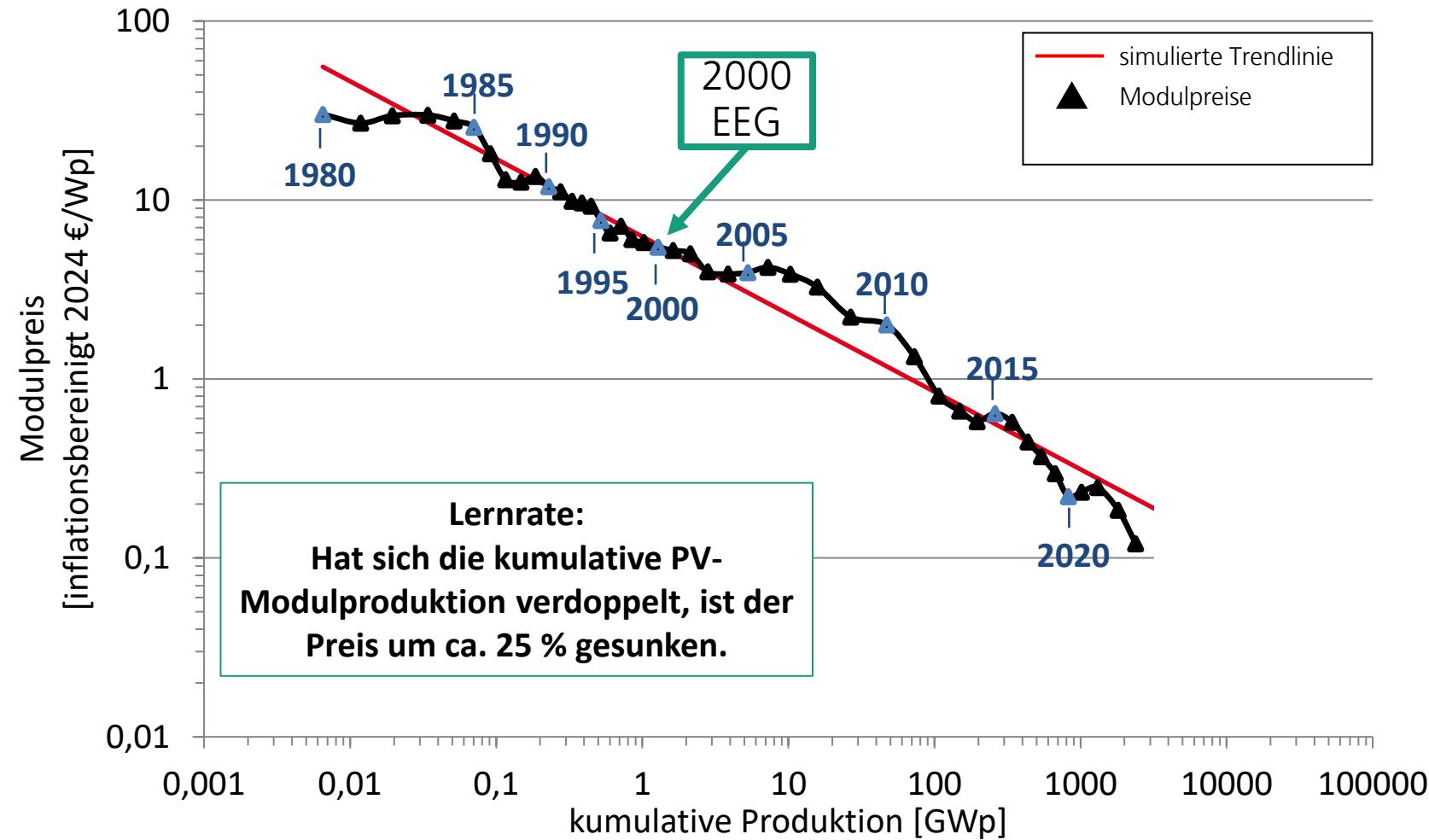


Die Erfolgsgeschichte der Photovoltaik

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.

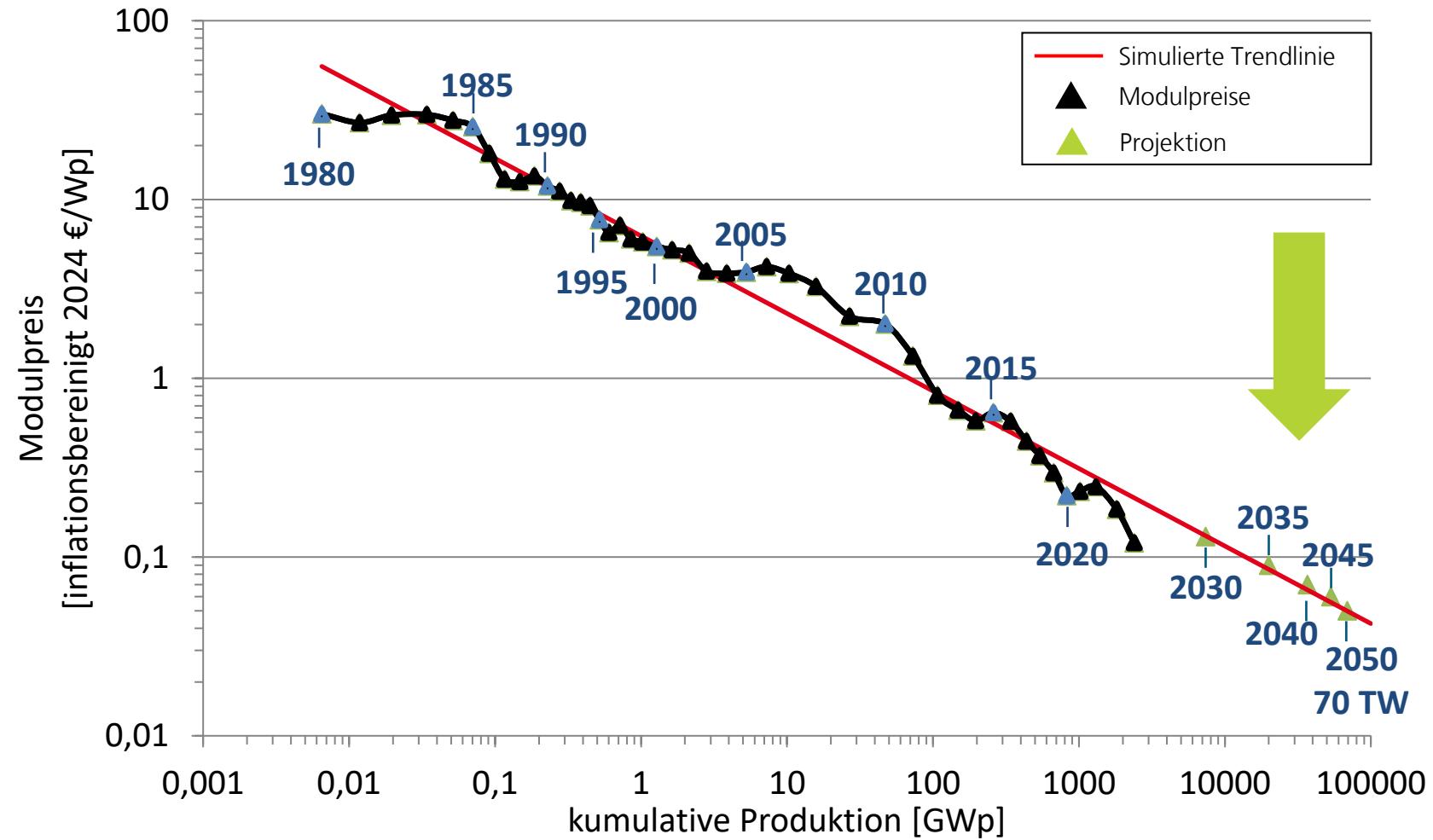


Die Erfolgsgeschichte der Photovoltaik

PV hat heute die niedrigsten Gestehungskosten in €cent/kWh

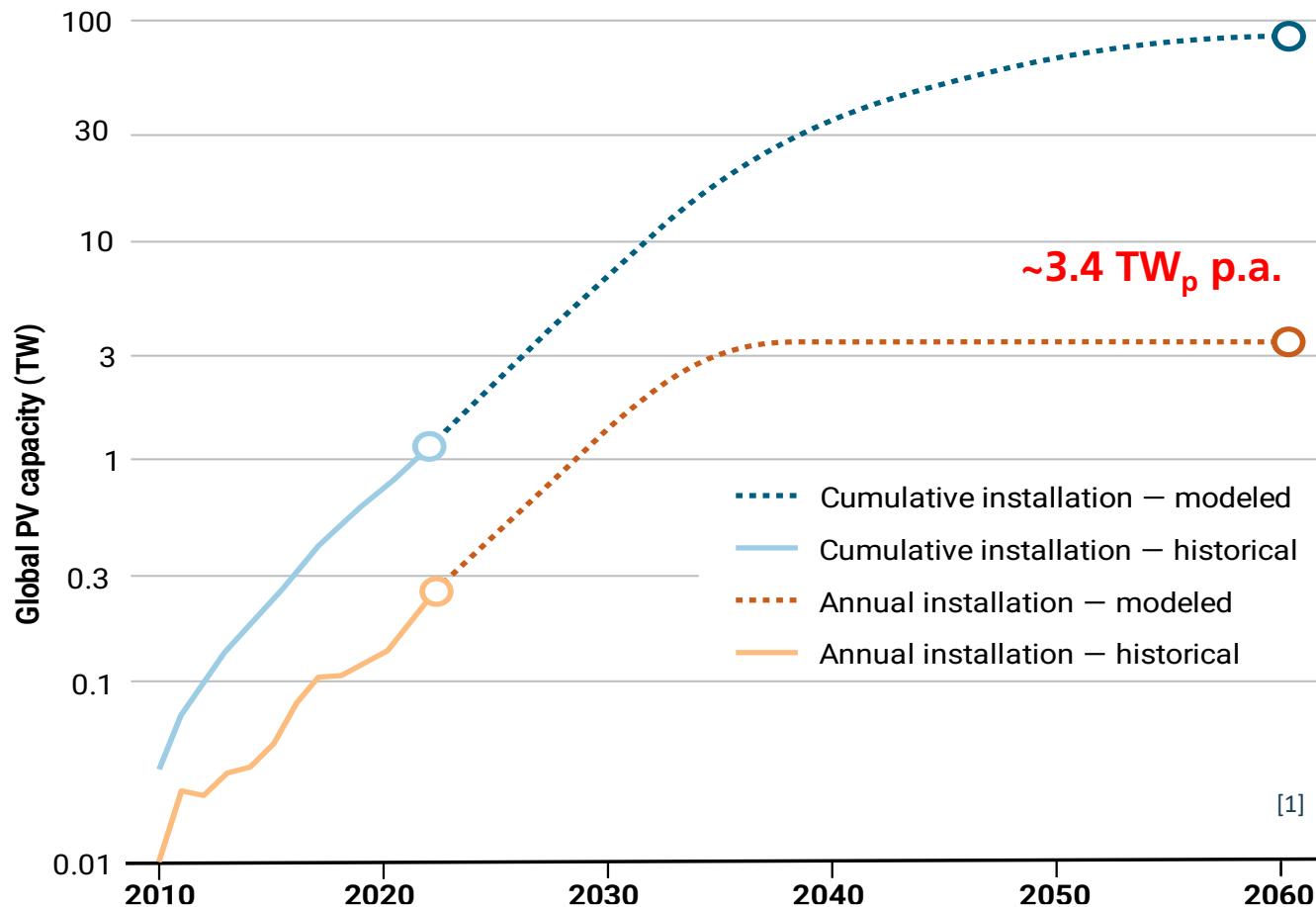
Treibende Faktoren der Preisreduktion:

- 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_p kum.



13

©Fraunhofer ISE

N. Haegel, A.W. Bett et al., *Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option*, 2023, Science, 380 (6640), DOI: 10.1126/science.adf6957

POLICY FORUM [1]

RENEWABLE ENERGY

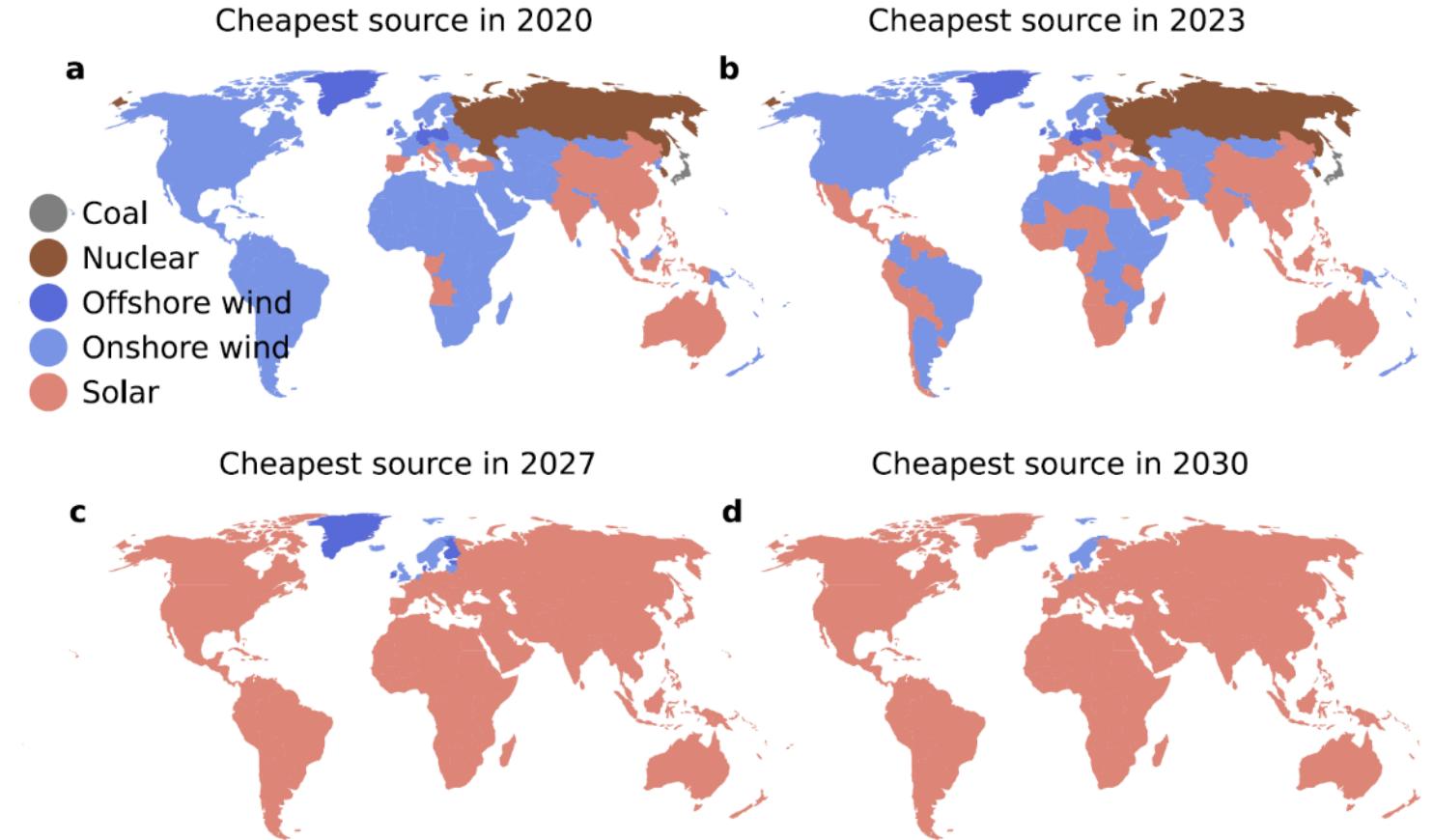
Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option

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 Philippss, Michael Powalla, Uwe Rau, Thomas Reindl, Maria Roupani, Keiichiro Sakurai, Christian Schorn, Peter Schossig, Rutger Schlatmann, Ron Sinton, Abdellilah 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

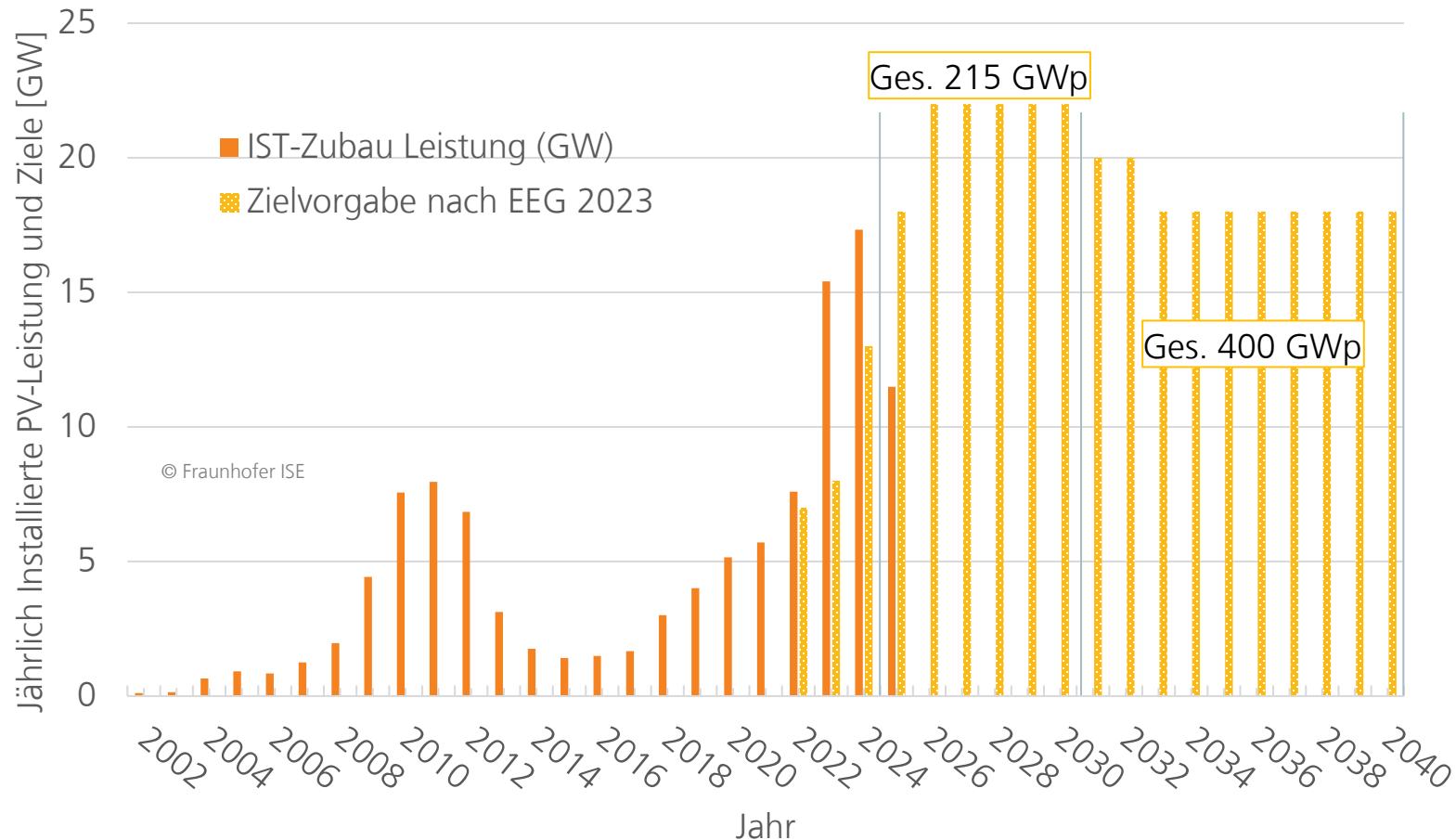


Bis 2030 wird Solarenergie in fast allen Regionen der Welt die günstigste Stromquelle sein.

Auch in der deutschen Energiewende ist PV eine tragende Säule

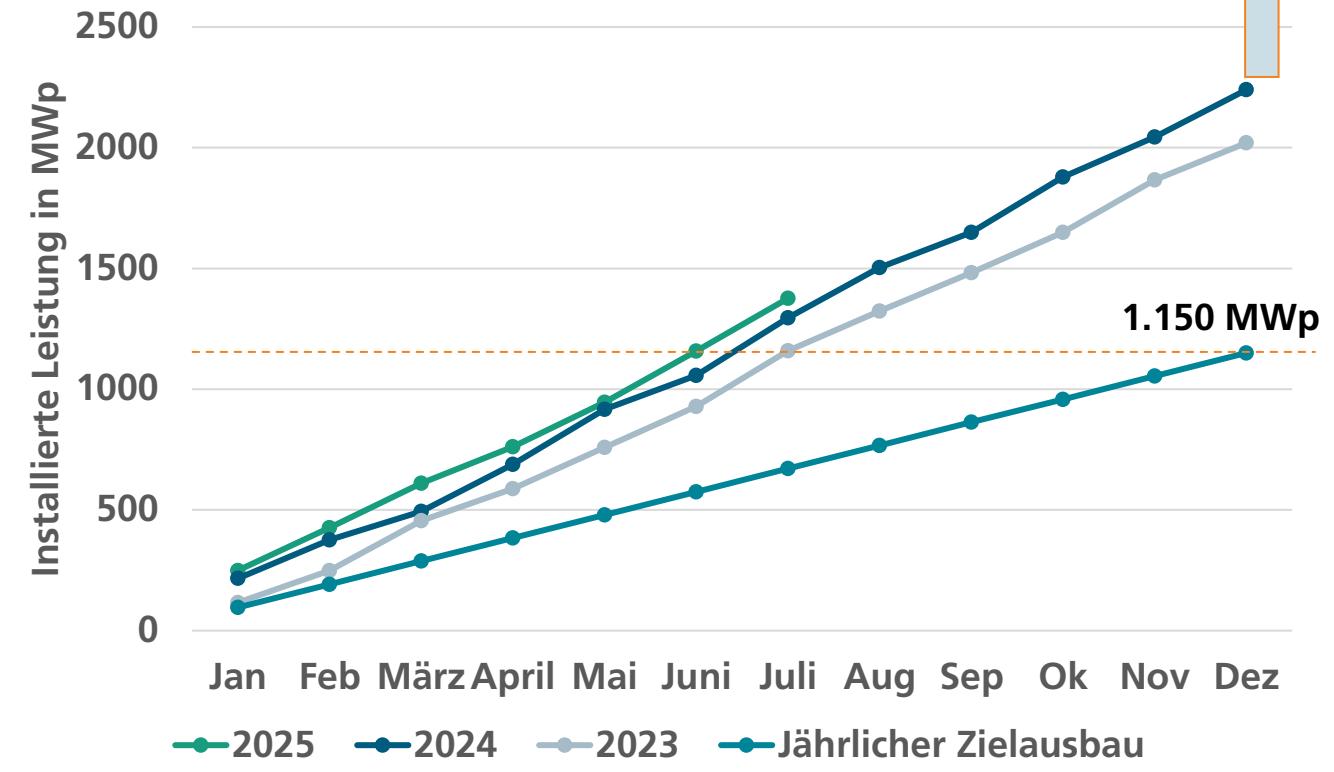
22 GWp pro Jahr Ausbau ab 2026 erfordert Installation von ca.:

- 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

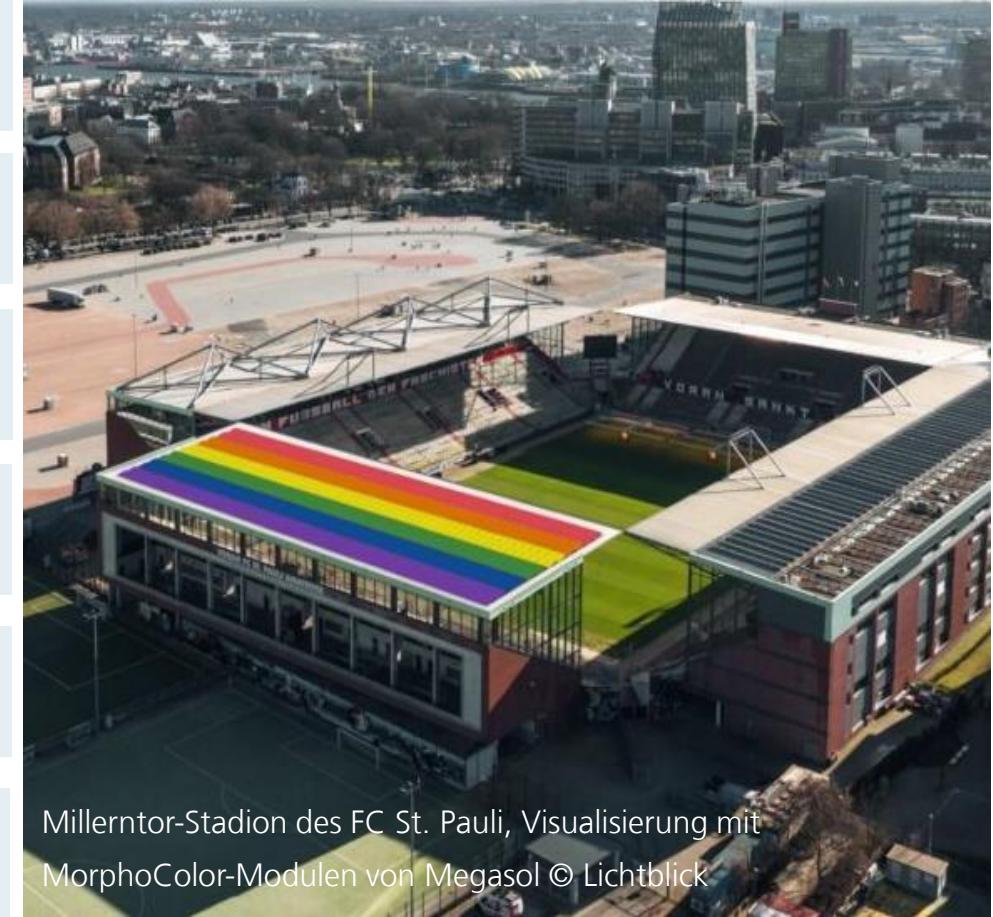
- Die Gesamtleistung in BaWü beträgt 13,8 GWp
- Zur Erreichung der Klimaneutralität sollen es 2030 24,6 GWp sein und 2040 47,2 GWp
→ Bis 2040 fehlen noch 33,4 GWp
- Nach einer Studie des Solar Clusters Baden-Württemberg, wird künftig ein Photovoltaik-Zubau von 4.000 MWp pro Jahr zur Klimazielerreichung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

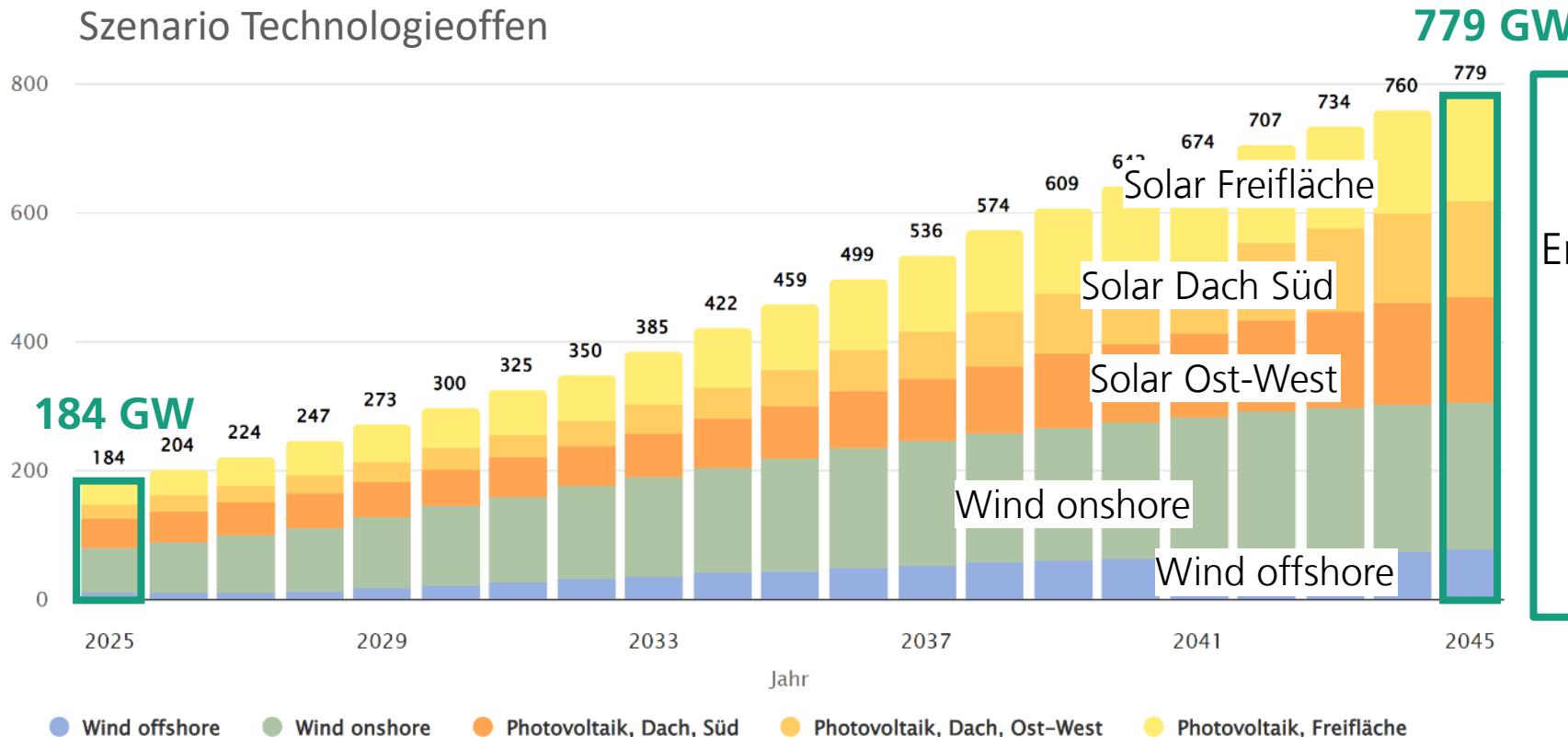


		PV	Wind	Batterie	Elektrolyse	Konventionelle Kraftwerke	Wärme-pumpen	E-Mobilität: PKW	E-Mobilität: LKW
		GW	GW	GWh	GW	GW	Anzahl in Millionen	Anzahl in Millionen	Anzahl in Millionen
2030	Szenarien-bandbreite	171 ↓ 202	130 ↓ 144	49 ↓ 104	4 ↓ 11	96 ↓ 111	4,5 ↓ 5,8	12 ↓ 20	0,05 ↓ 0,07
2045	Szenarien-bandbreite	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

Fluktuierende Erzeugung

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



Erzeugungsszenario 2045

Erforderlicher Ausbau in Deutschland

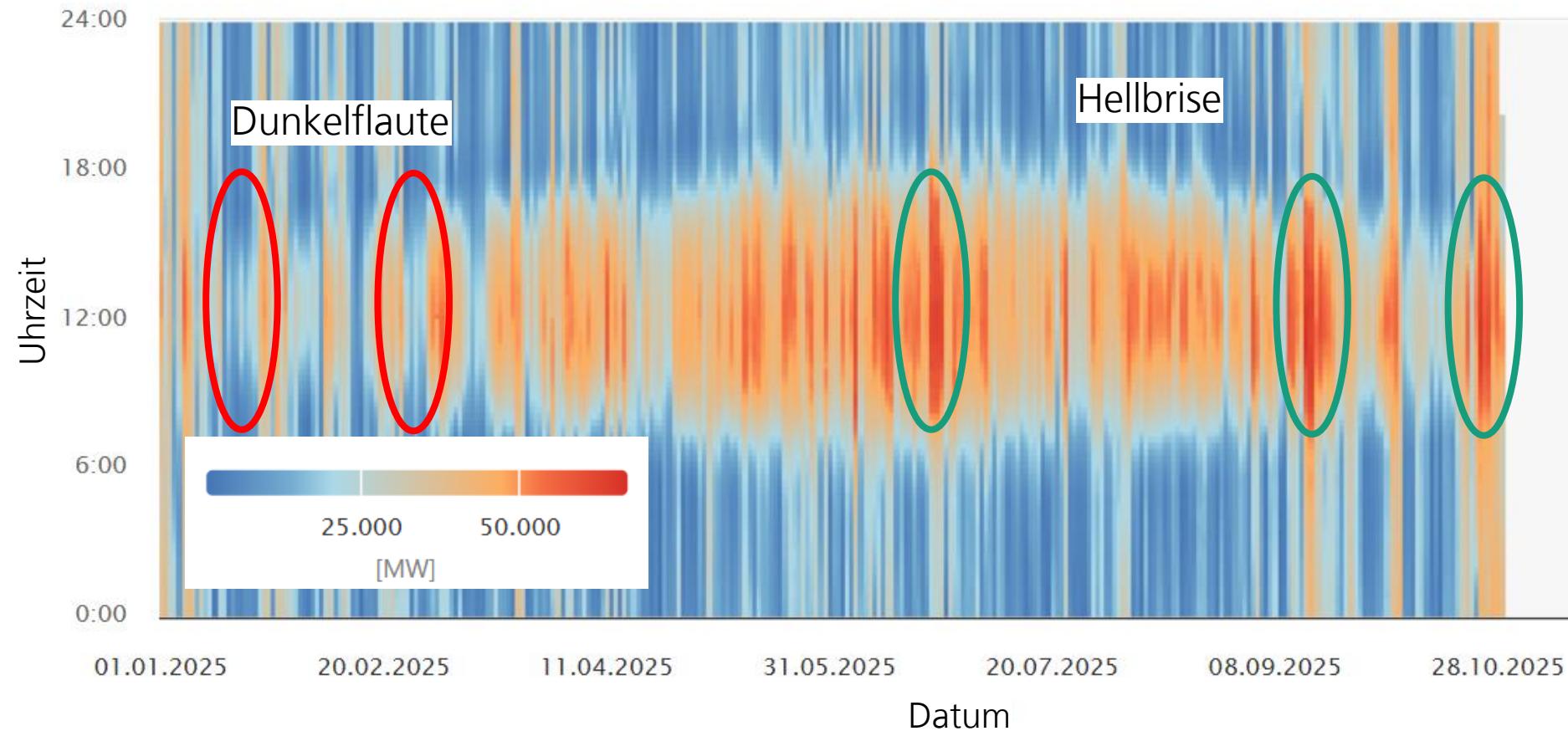
PV 102 GW → 472 GW (x 4,6)

Wind 82 GW → 308 GW (x 4)

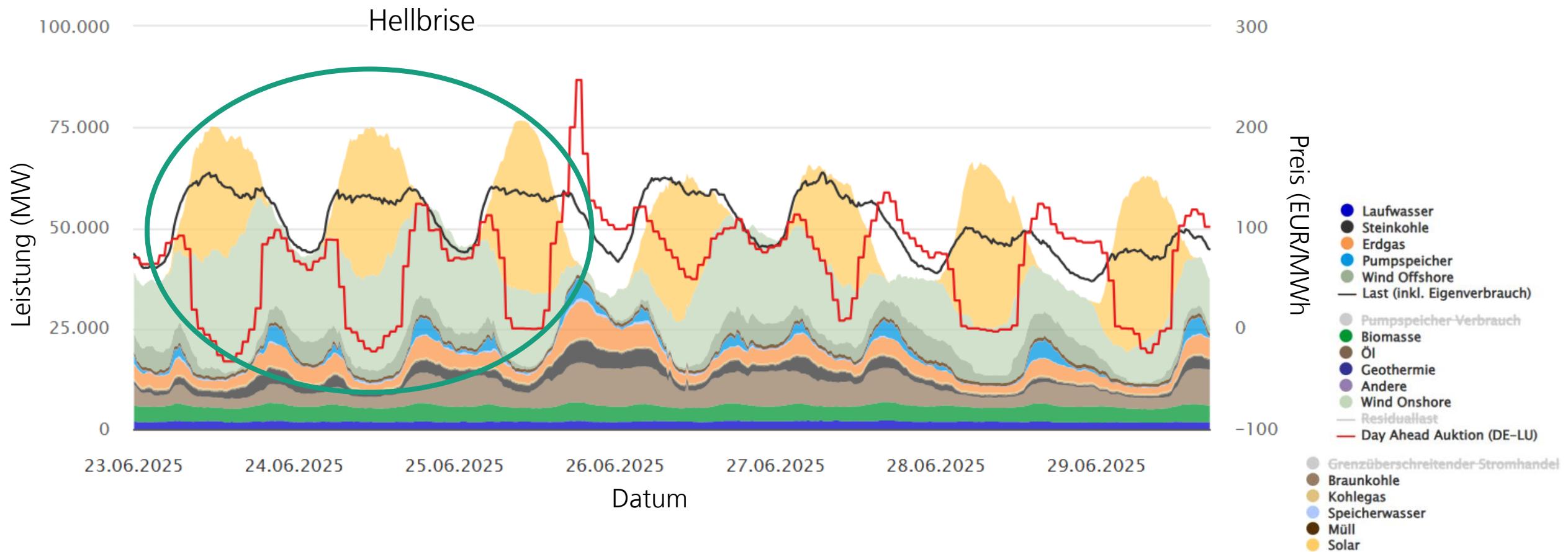
Öffentliche Nettostromerzeugung aus Solar und Wind (On- und Offshore)

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.



Wo die Energie aus Wind und Sonne zwischenlagert

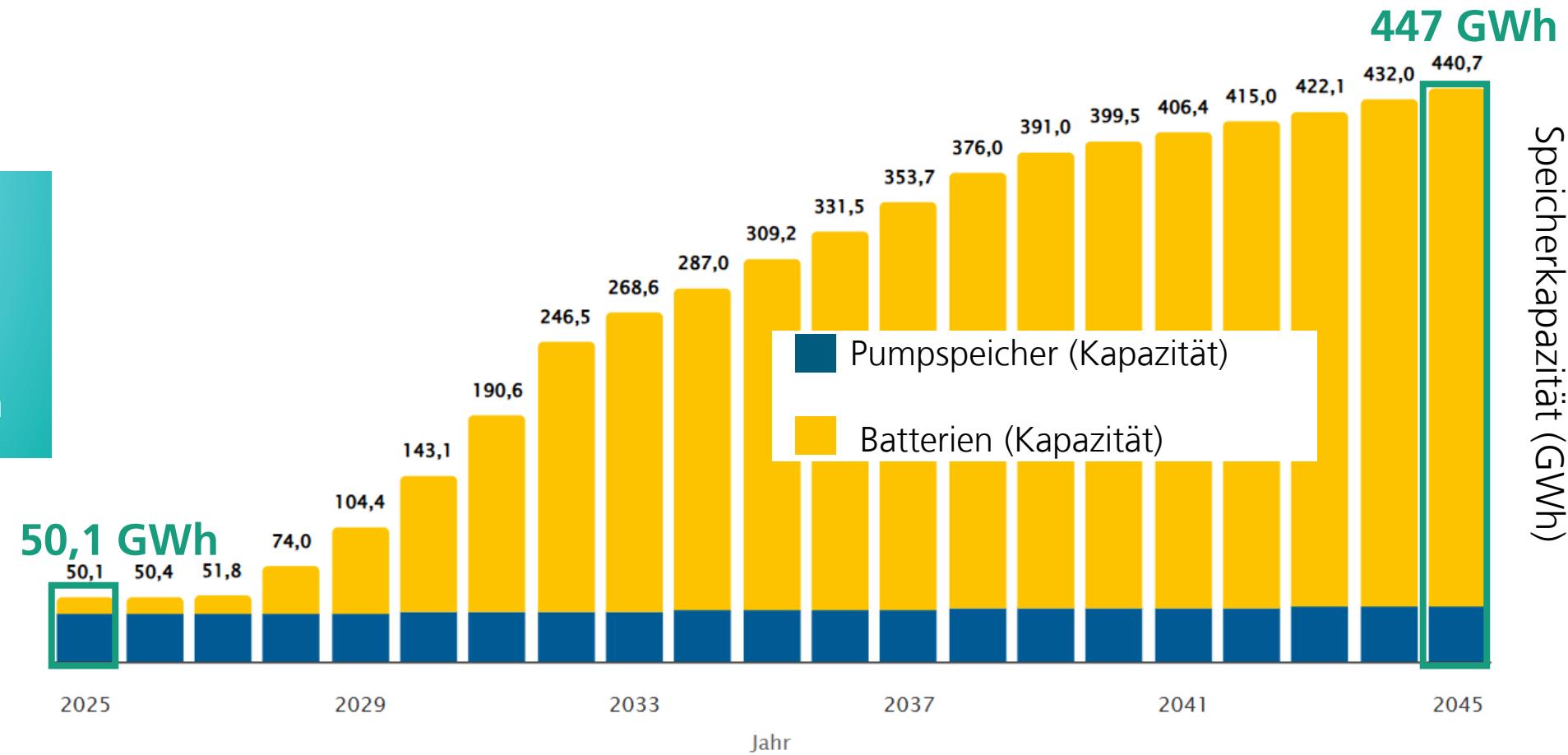


Das Energieunternehmen LEAG nennt diesen Stromspeicher BigBattery. Foto:



Bedarf an installierter Speicherkapazität bis 2045

Energiespeicher sind ein wesentliches Kernelement bei der Energie-Systemtransformation



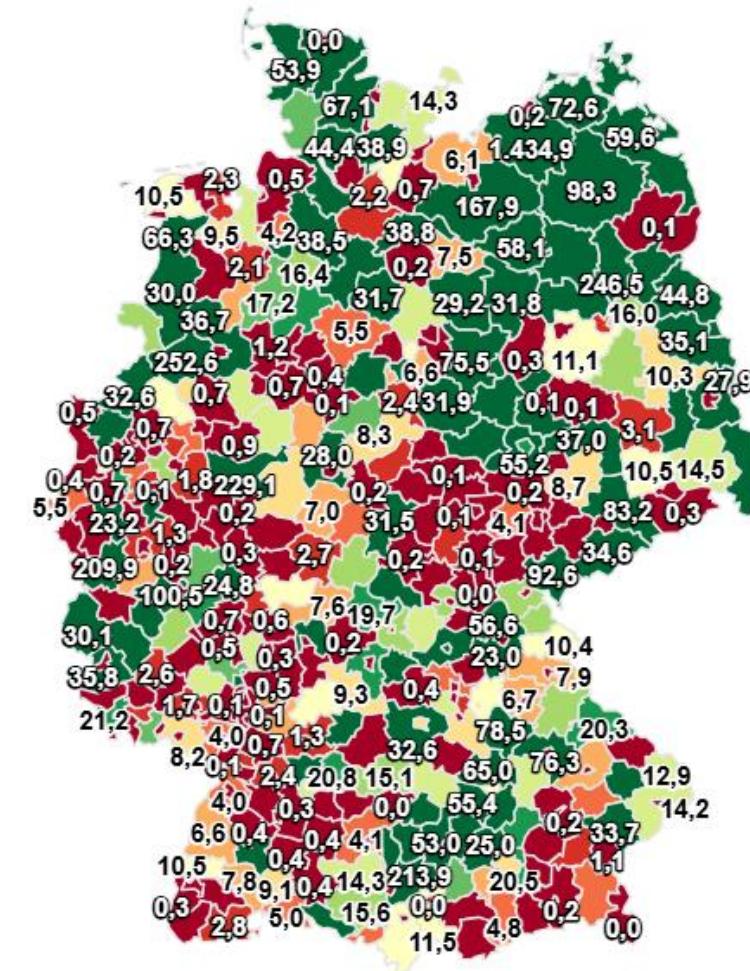
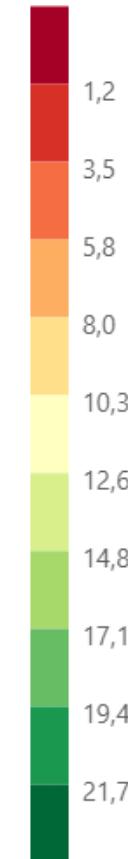
Geplante Batteriekapazität in Deutschland

- Gesamtkapazität 10,759 MWh

Für Interessierte:

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

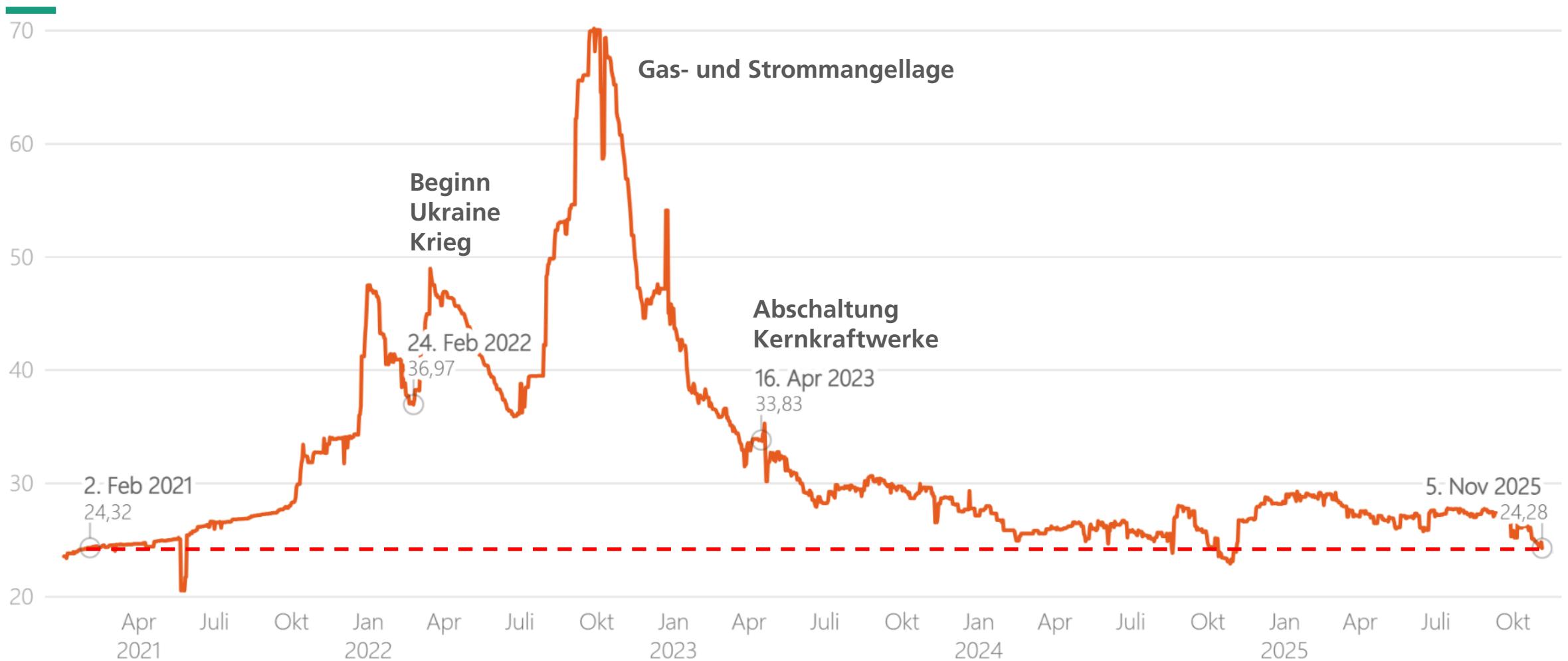
<https://s.fhg.de/energy-charts-talks>



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

Strompreisentwicklung für Neukunden

Verivox



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

25

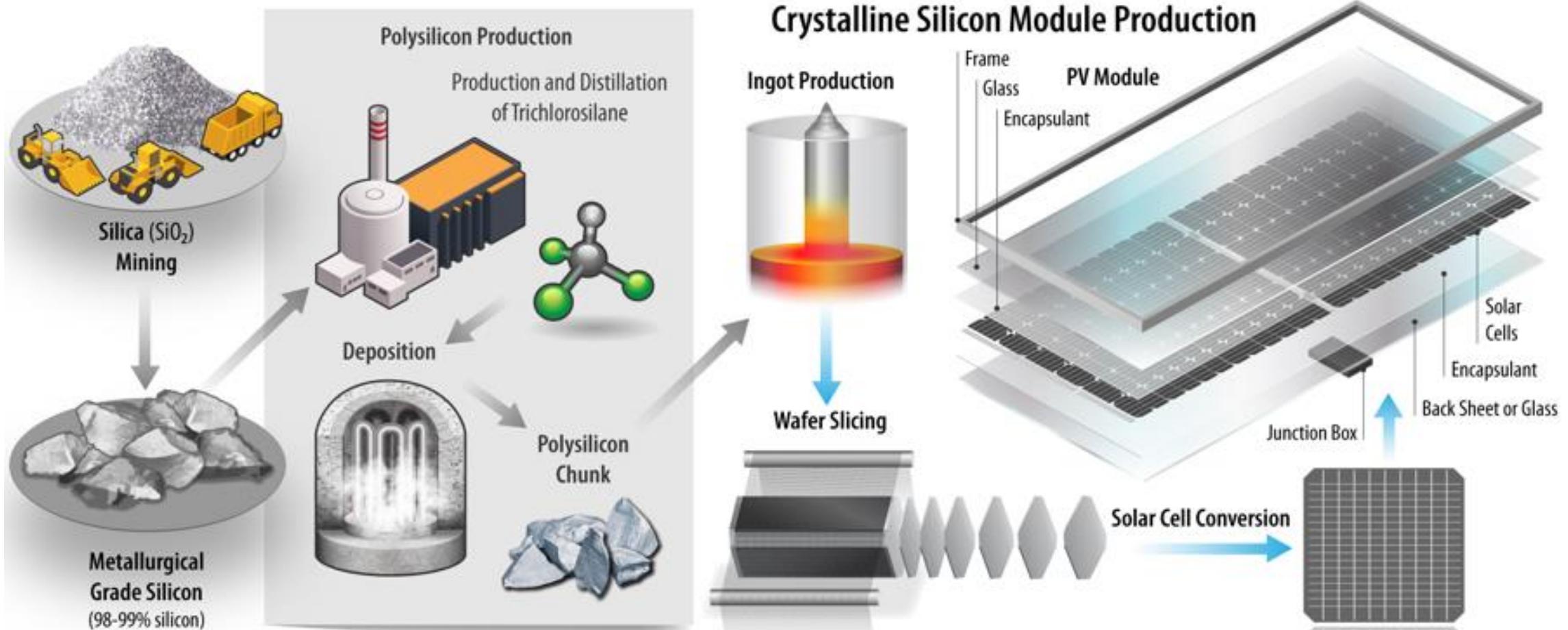
©Fraunhofer ISE
public

Agenda

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

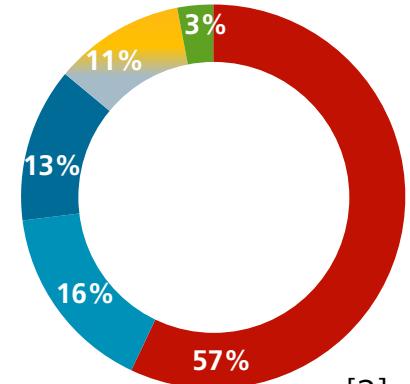
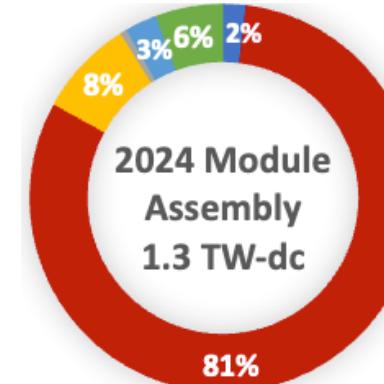
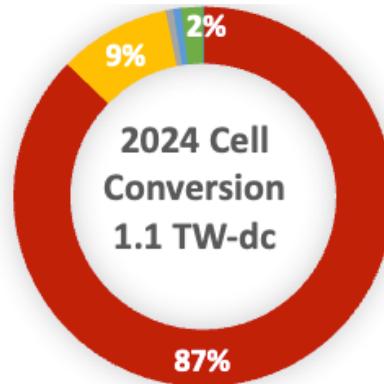
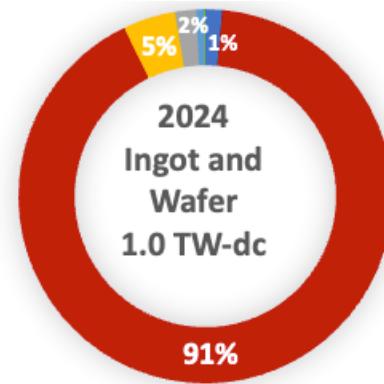
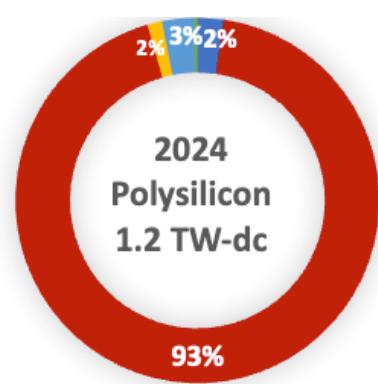
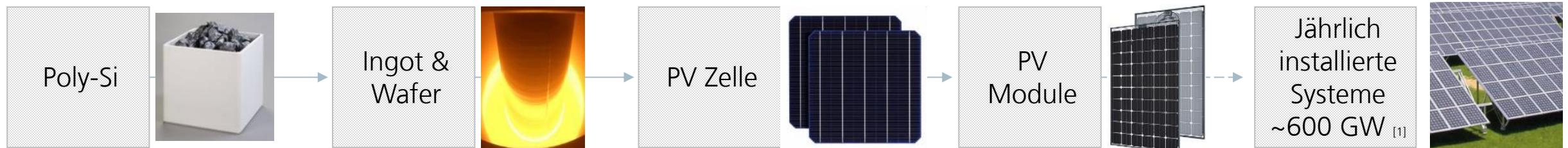


Die Photovoltaik Wertschöpfungskette aktuell



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

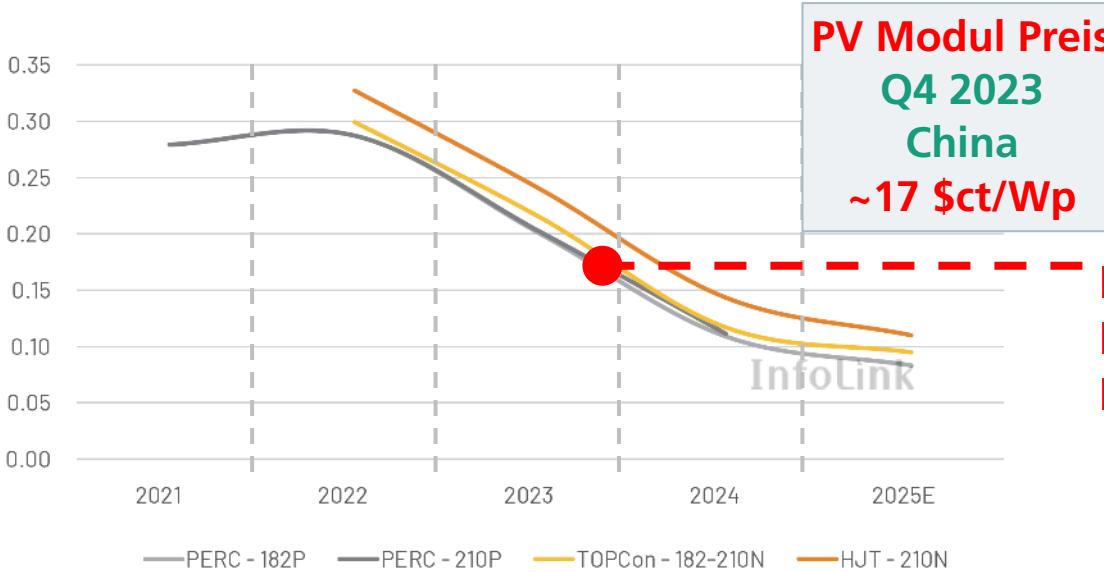
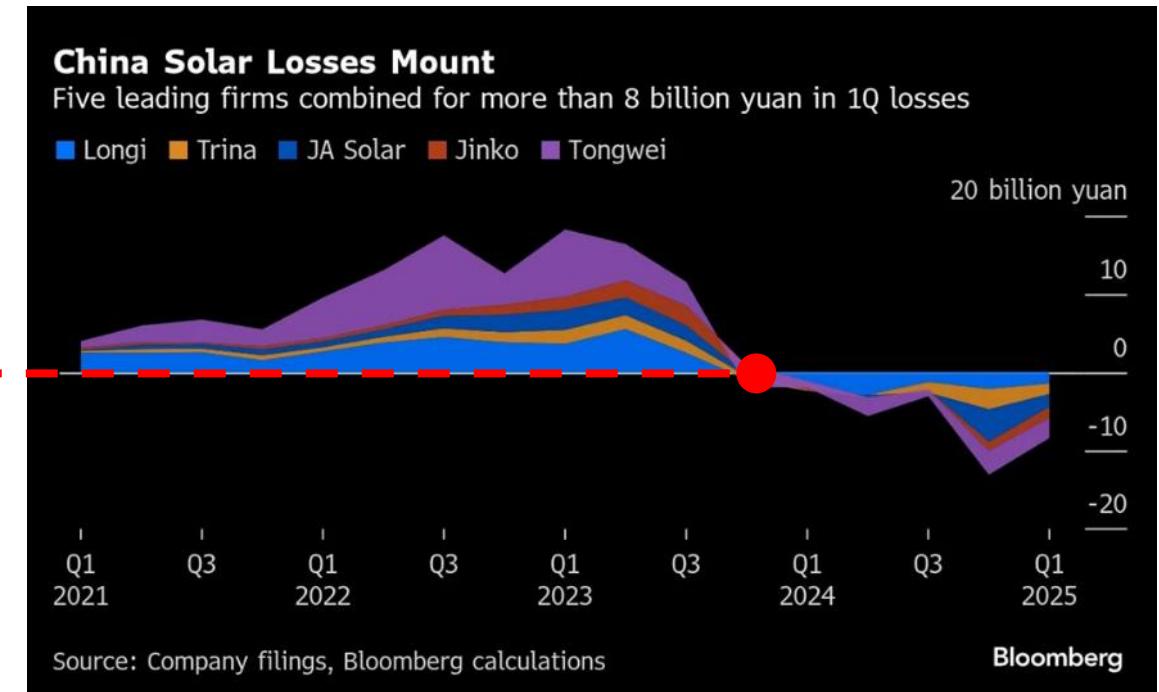


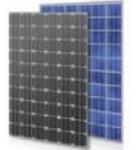
Figure 1.2-21. Module price trends in China¹⁰, 2021-2025, Unit: USD/W



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



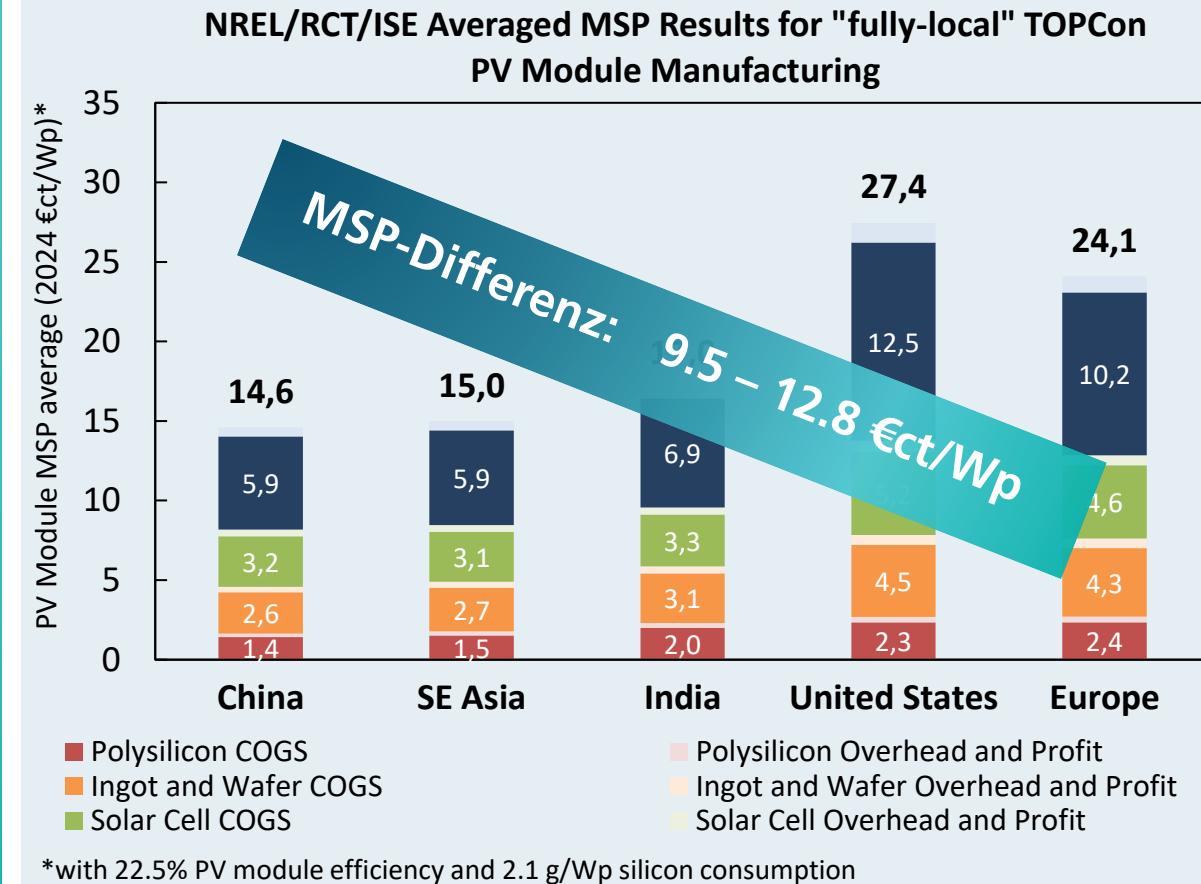
Module

Sind europäische PV-Module wirklich teurer als asiatische?

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

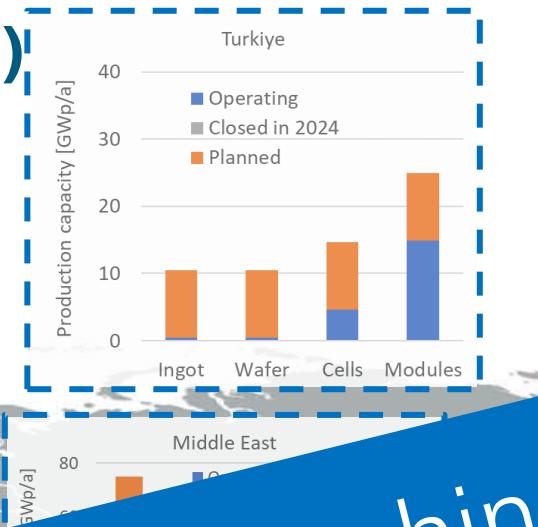
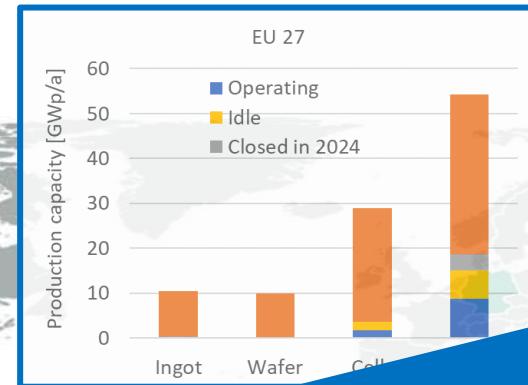
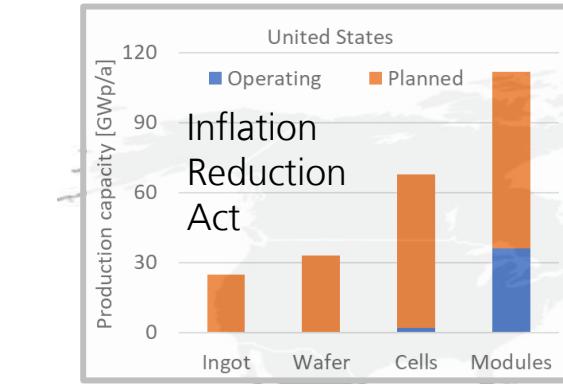
Berechnet wird der Mindestpreis der Gesamtkostendeckung für jede Produktionsstufe. Man spricht von *Minimum Sustainable Price (MSP)*.

Im Preis enthalten sind:
Produktionskosten, Gemeinkosten und Gewinne



Globale Kapazitätslandschaft (ohne China)

Laufende und angekündigte Kapazitäten



Exportchancen für den Maschinenbau

- Operating
- Closed in 2024
- Planned

Status 05/25

Fraunhofer
ISE

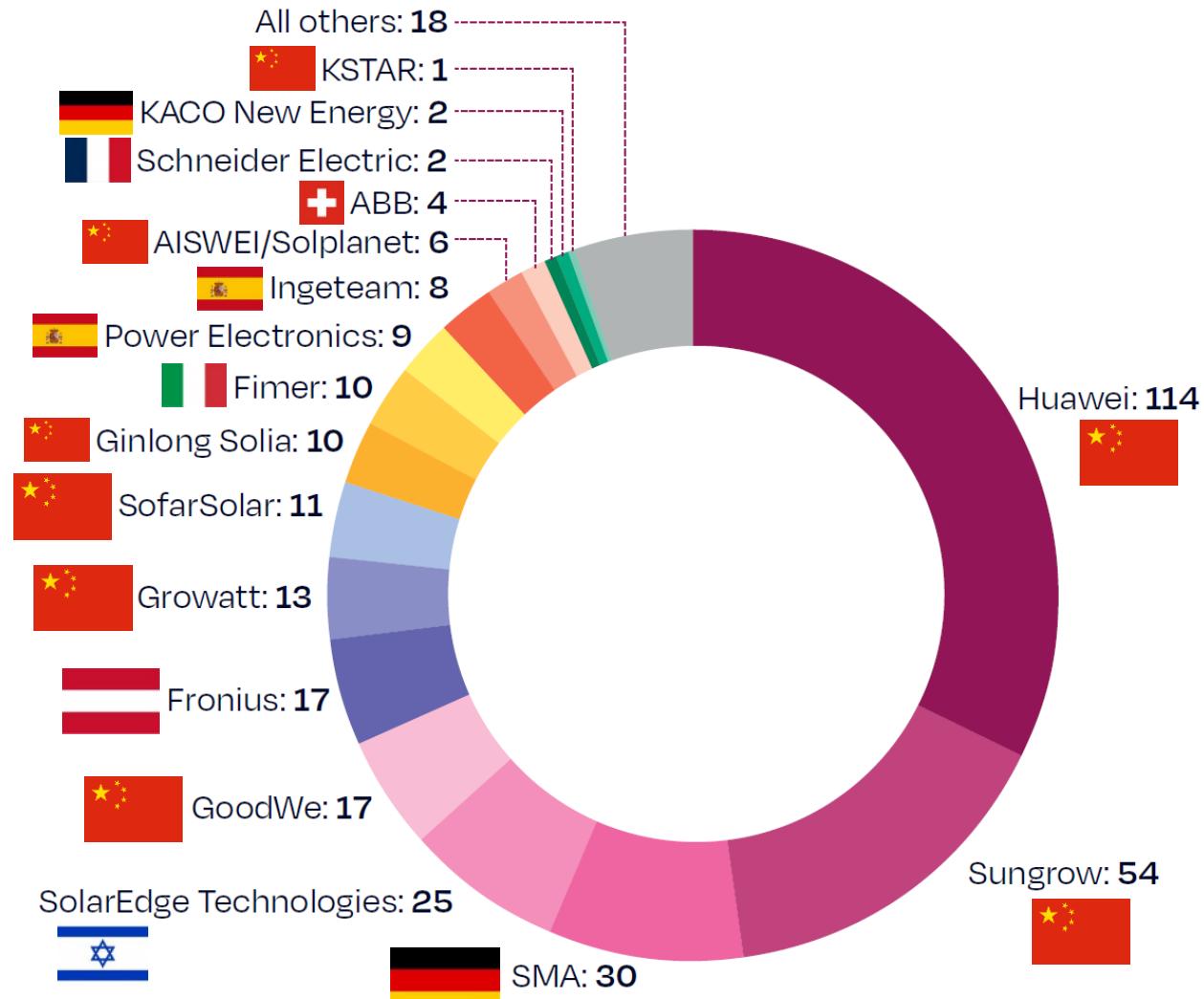
Marktübersicht PV-Wechselrichter

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



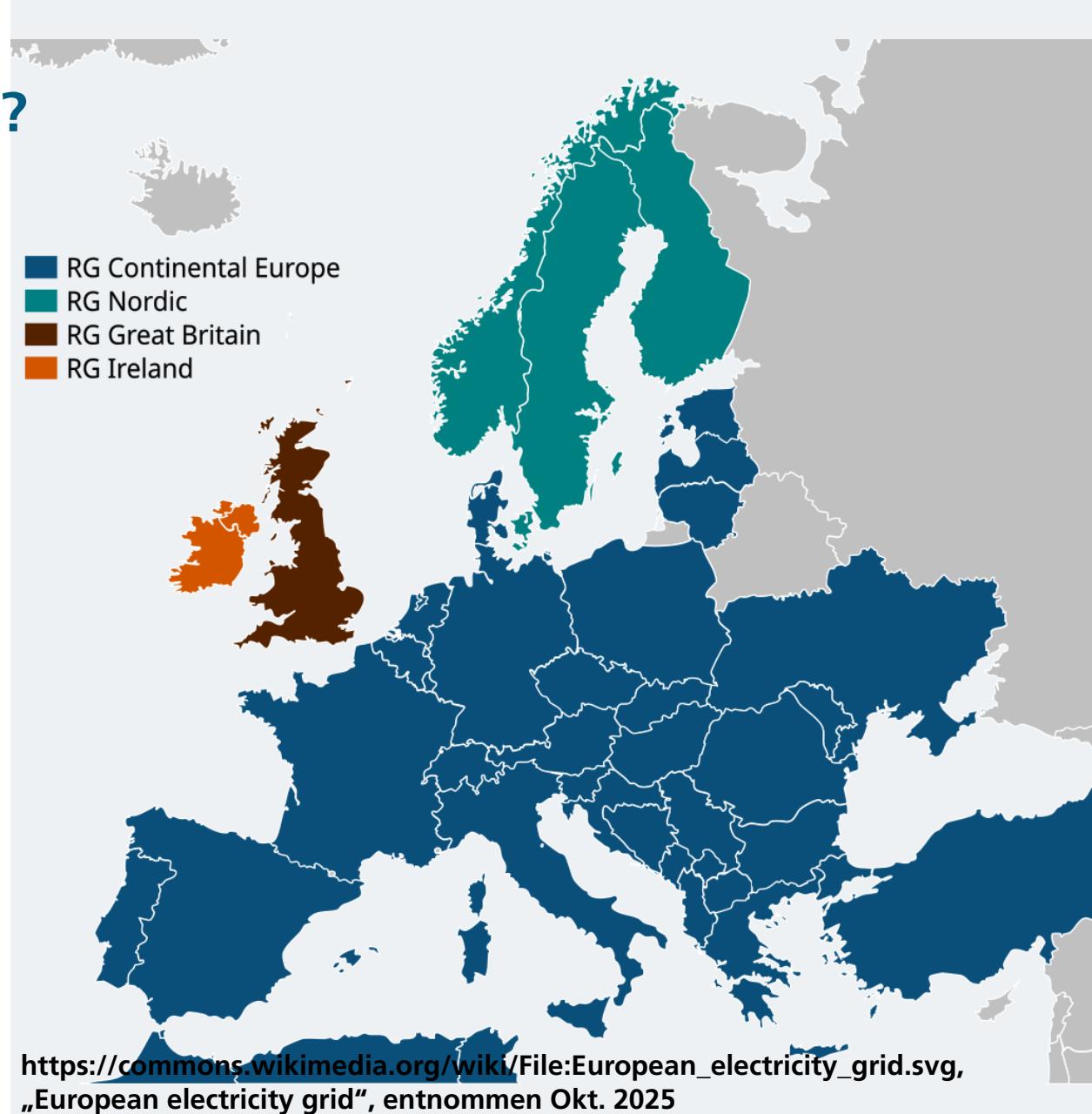
© https://easy-peasy.ai/

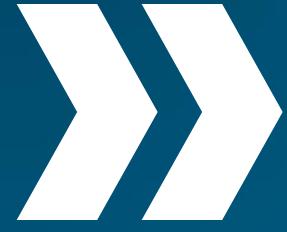
PV-Kraftwerke

- 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

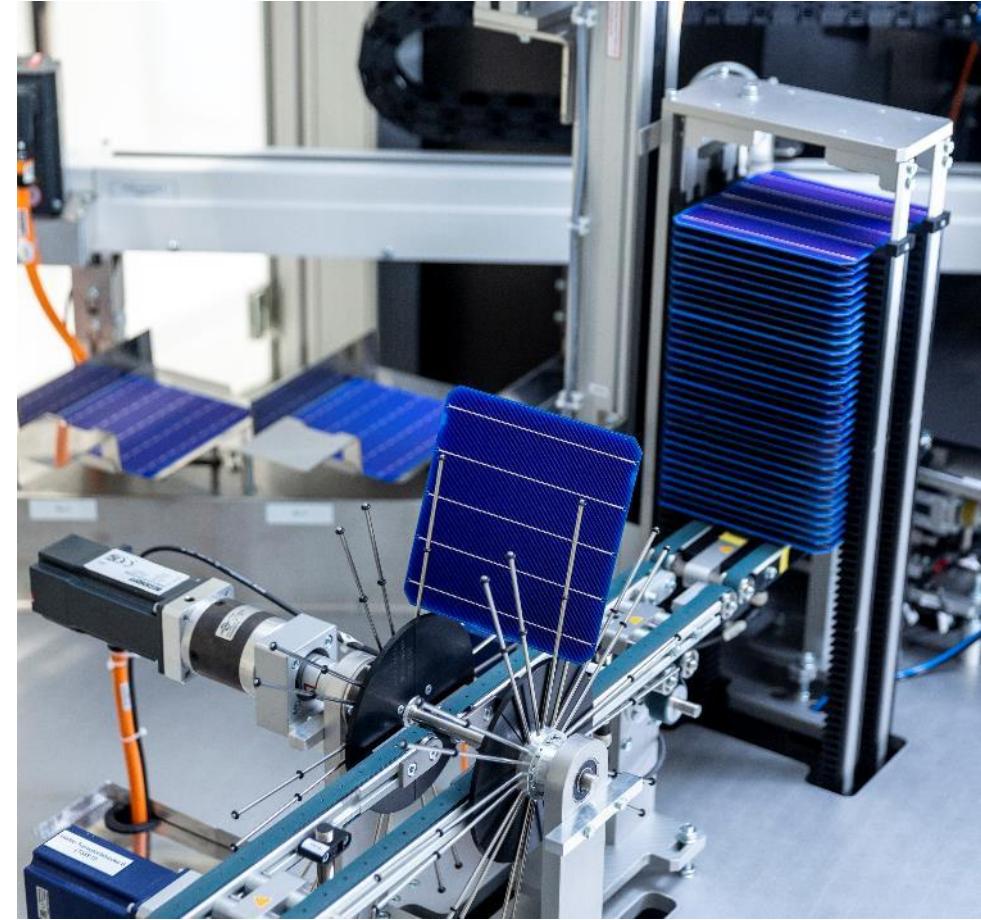




**Wir gefährden unsere sichere
Energieversorgung, wenn wir von China
abhängig bleiben bzw. werden.**

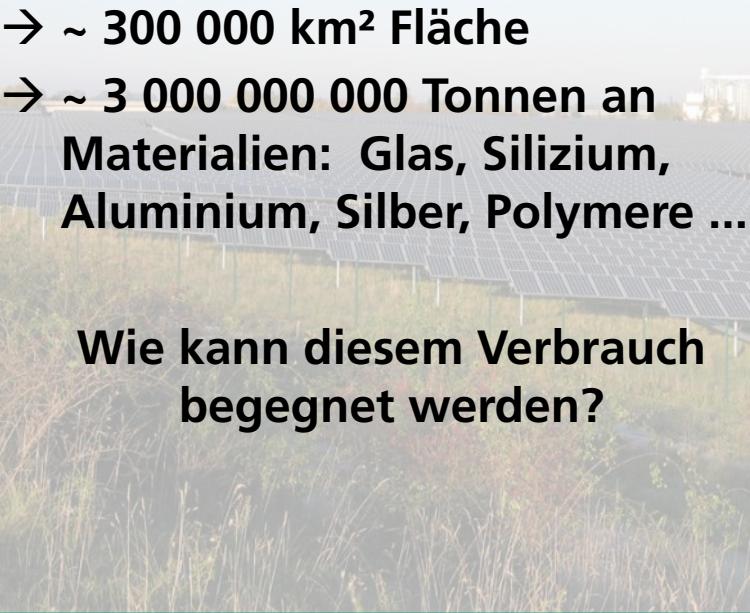
Agenda

- 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

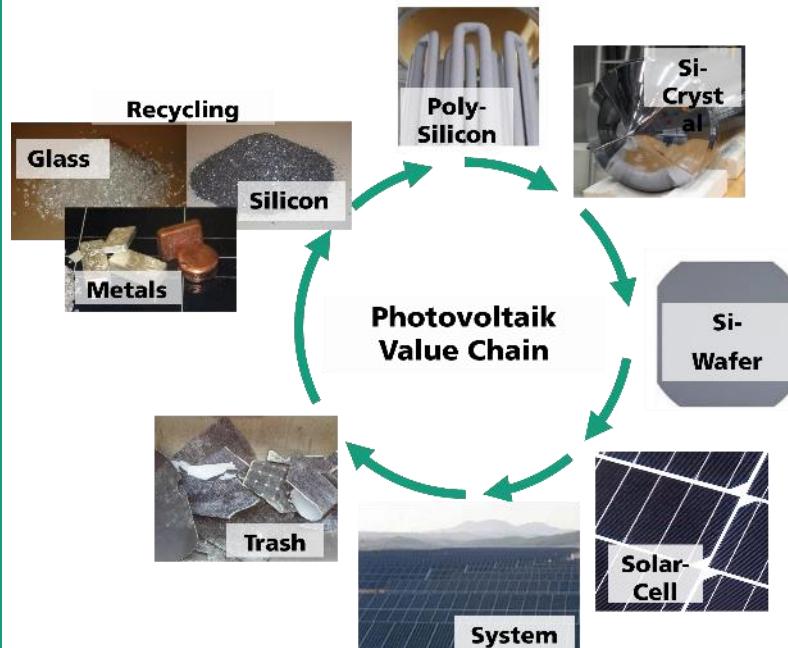
Für den globalen PV-Ausbau wird eine große Menge an Ressourcen benötigt. Europa sollte als Innovationstreiber Verantwortung übernehmen.



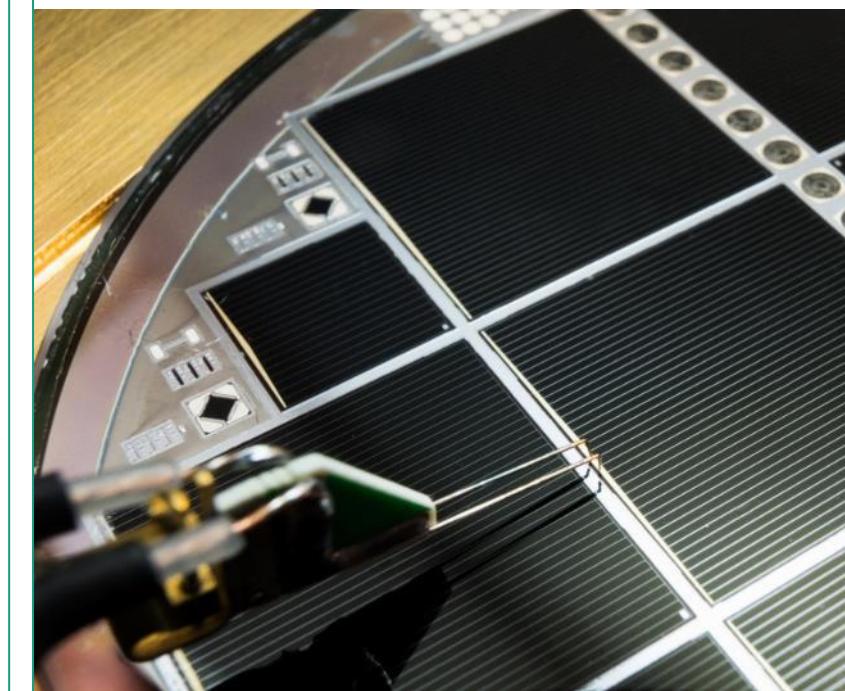
- ~ 300 000 km² Fläche
- ~ 3 000 000 000 Tonnen an Materialien: Glas, Silizium, Aluminium, Silber, Polymere ...

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 CO₂-Fußabdruck

4 - Removal

EpiWafer

Si pre-wafer

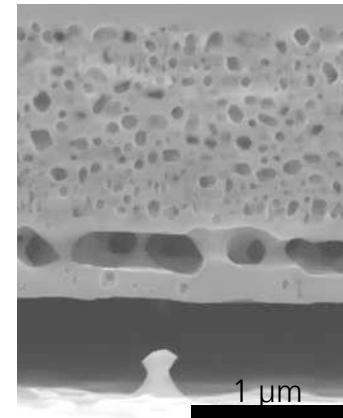
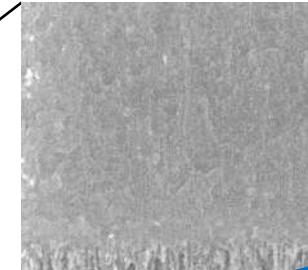
1 – Electrochemical etching

Si pre-wafer

re-use of
pre-wafer

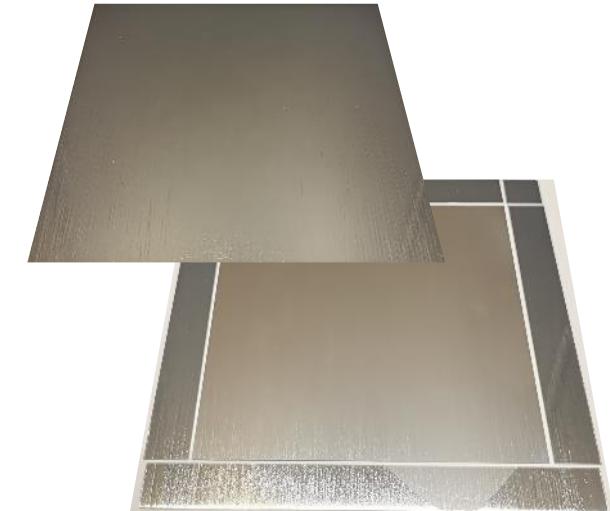
Si pre-wafer

3 - Si Epitaxy



Firma NEXWAFE in Freiburg treibt die industrielle Fertigung voran

APCVD batch reactor at
Fraunhofer ISE



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!

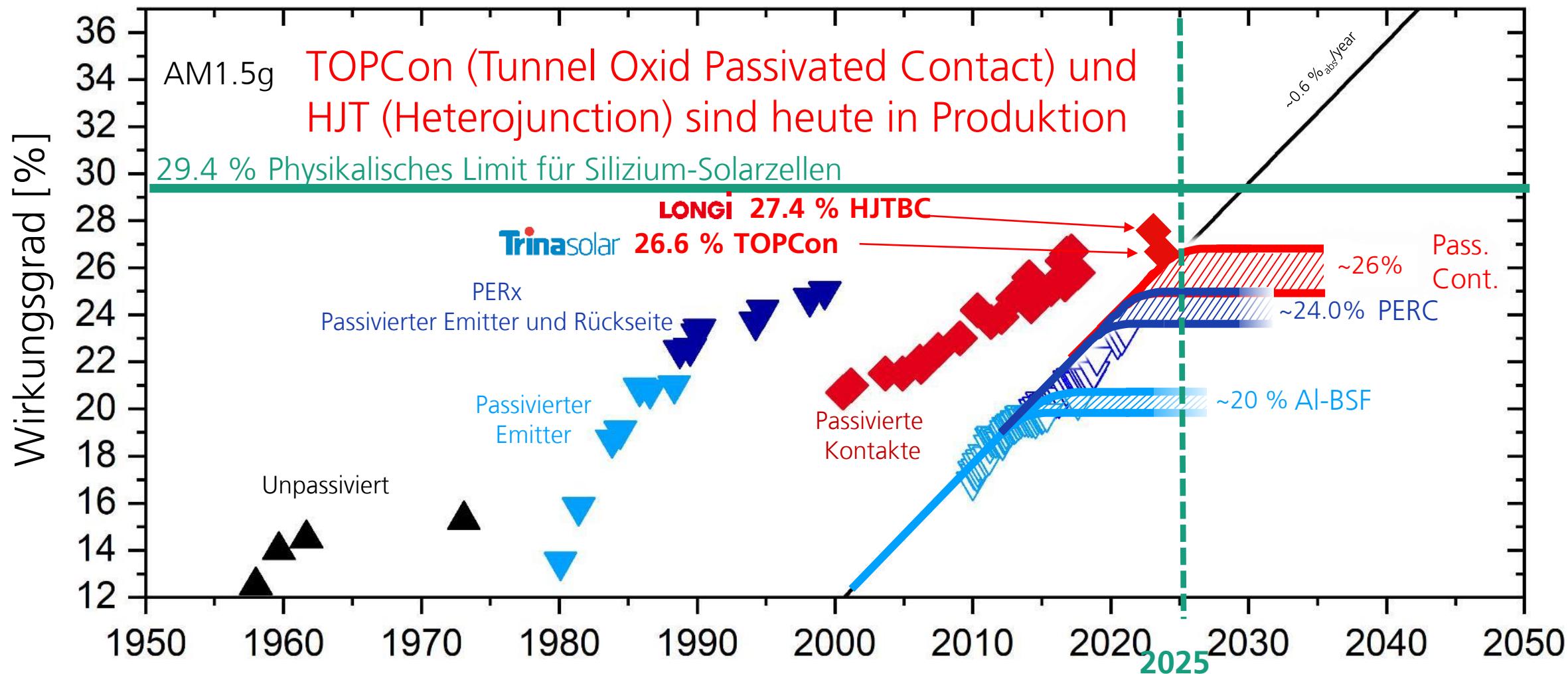
Demonstrator aus PERC-Zellen aus recyceltem Silizium, installiert auf dem Fraunhofer-Testfeld.



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

Wirkungsgrade von Solarzellen - Geschichte und aktueller Stand

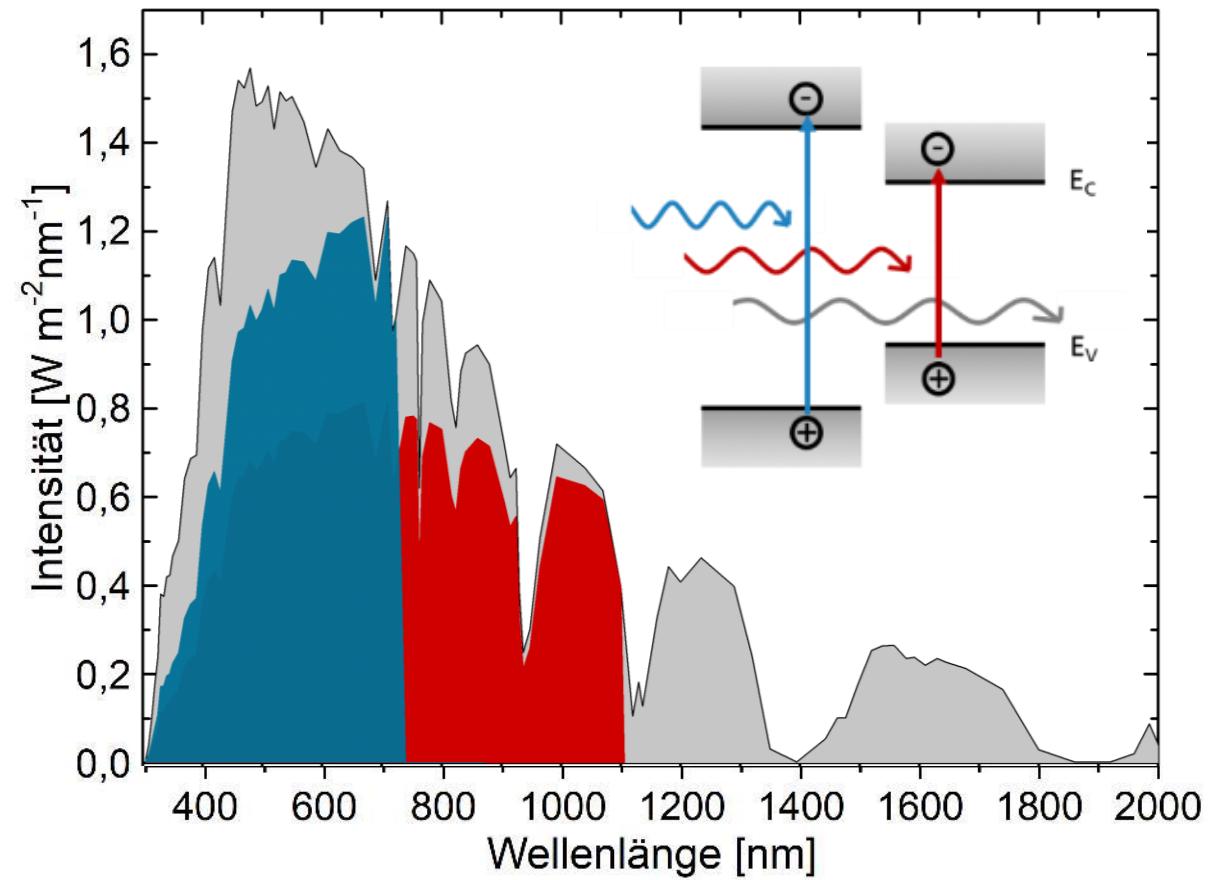
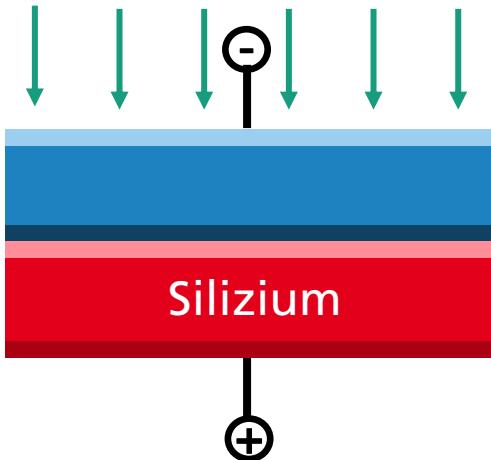
Labor-Rekorde (Symbole) und industrielle Produktionswerte (Linie)



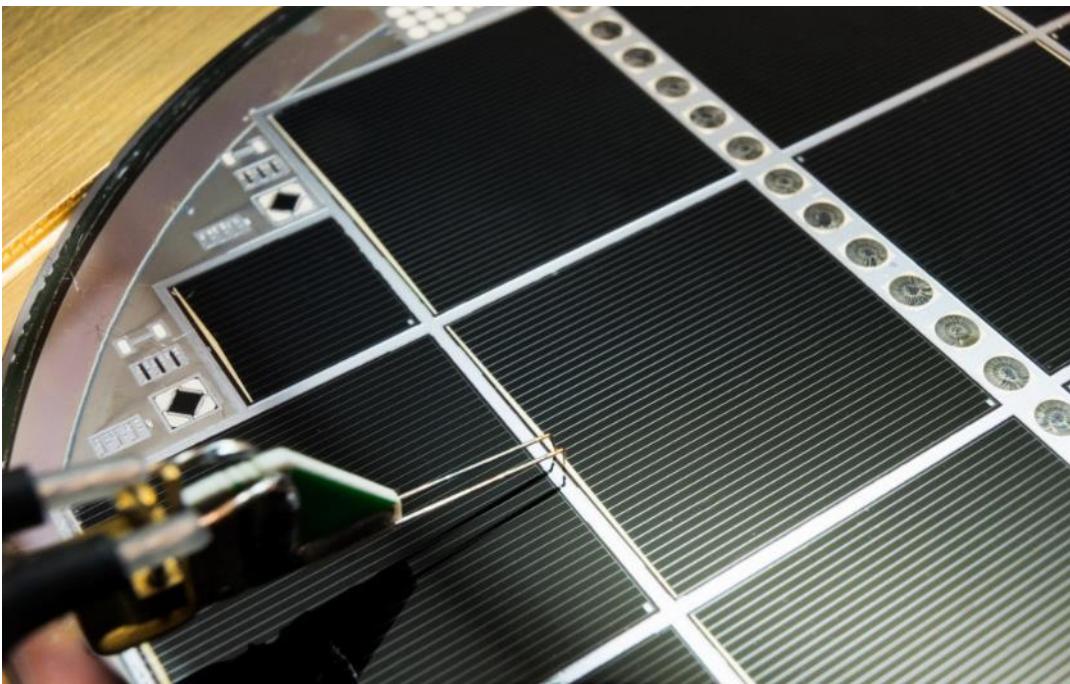
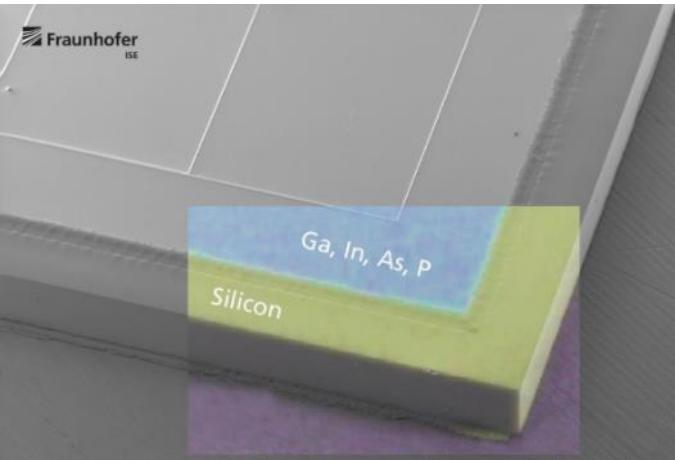
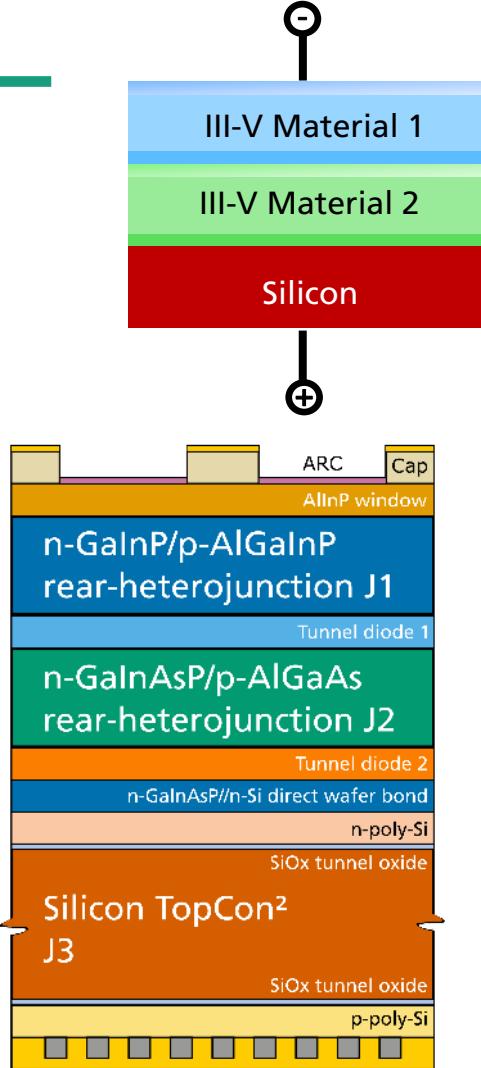
Das physikalische Limit von Silizium-Solarzellen überschreiten

Tandem-Solarzelle

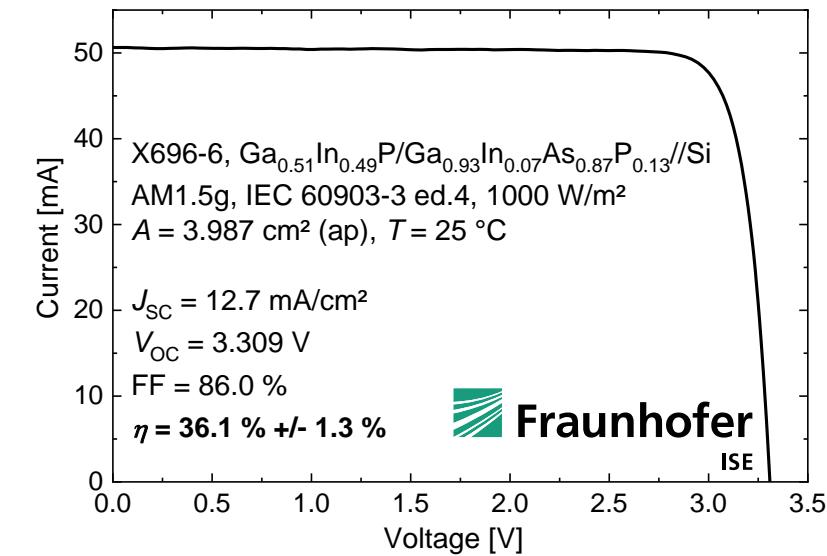
- Die Sonne hat ein breites Spektrum an Farben/Wellenlängen.
- Nur eine Wellenlänge kann von einem Solarzellentyp effizient genutzt werden.
- Zwei Solarzellenmaterialien können das Spektrum aufteilen - Tandemsolarzellen



III-V//Silizium Tandem Zellen

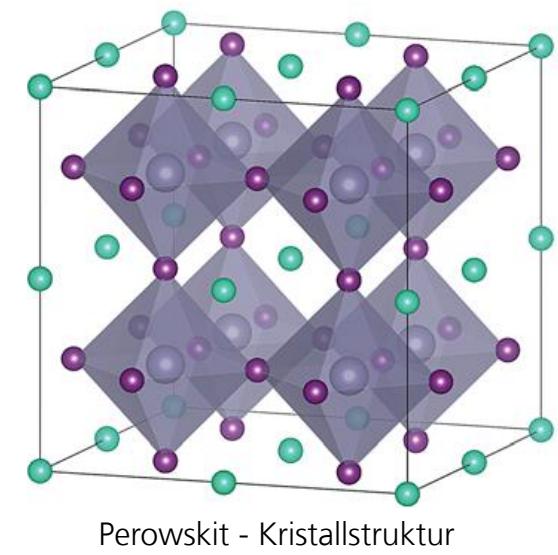
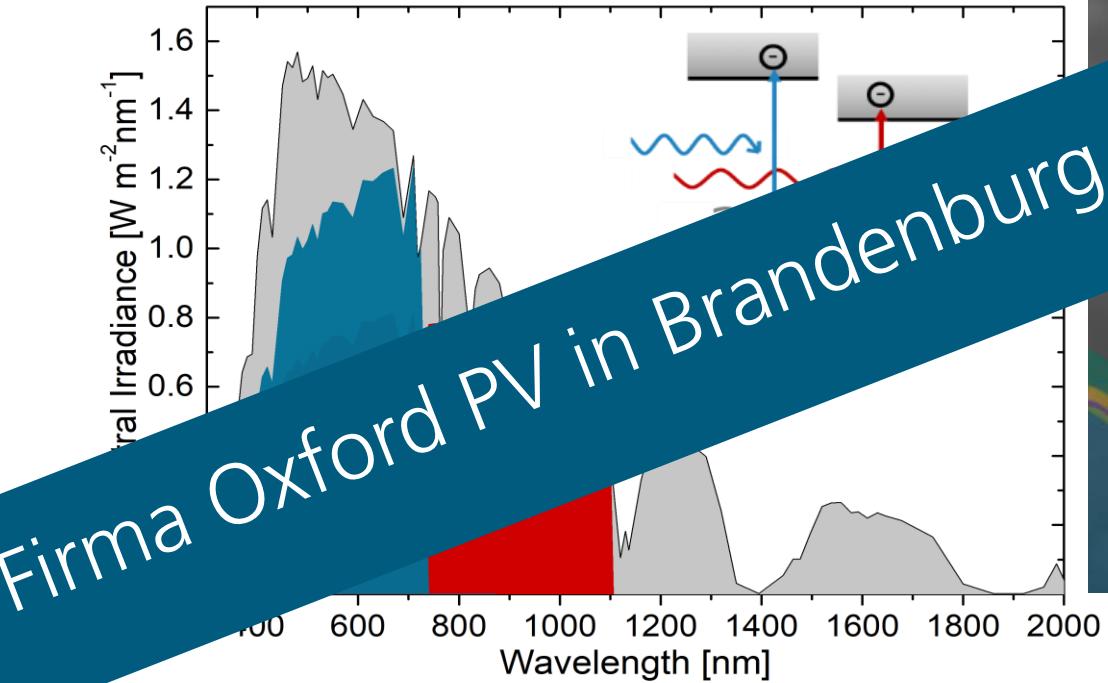


36,1% (AM1,5g)
Rekord für monolithische
Tandemzellen auf Siliziumbasis



Perowskit-Silizium Tandem

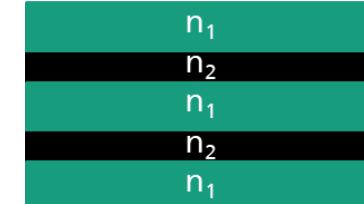
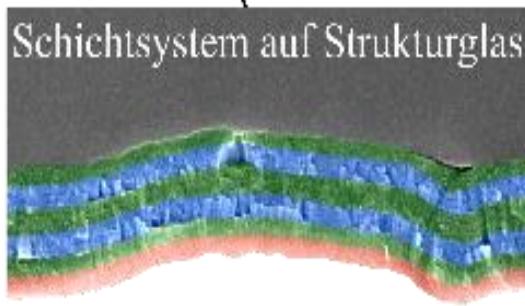
Sehr dünne Schichten auf Silizium!
Langzeitstabilität ist eine aktuelle Herausforderung



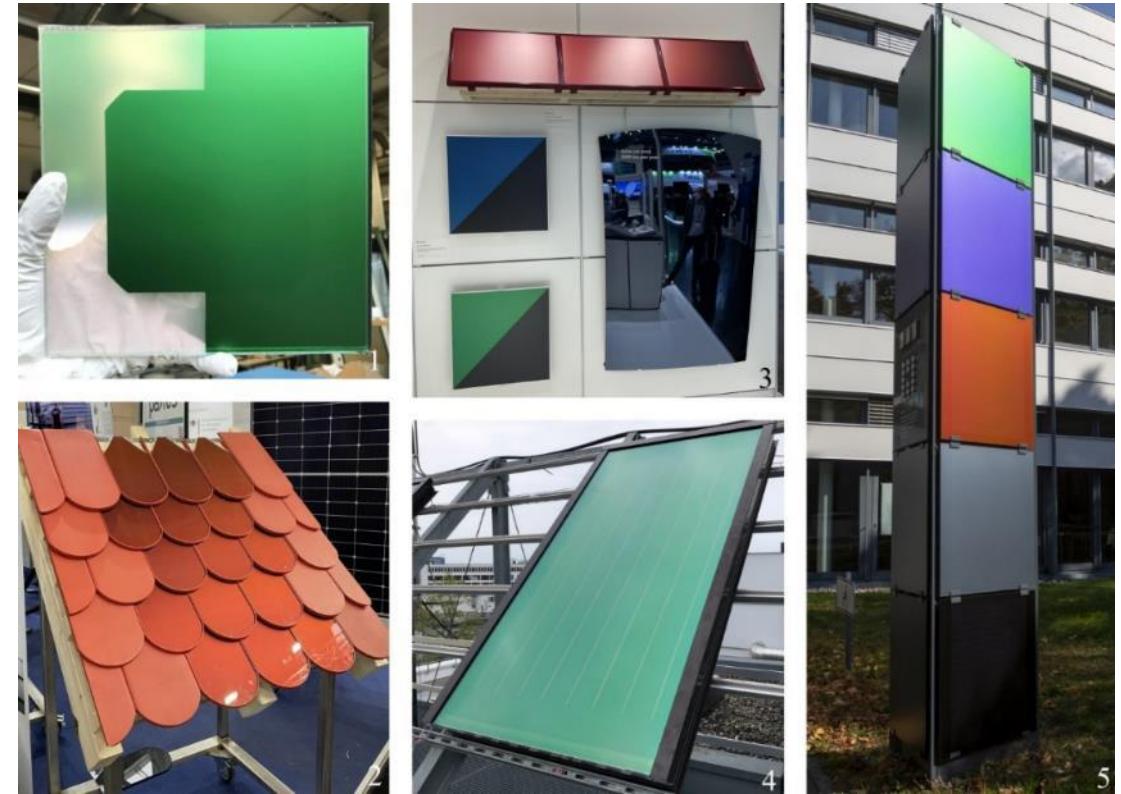
Fassadenintegration

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



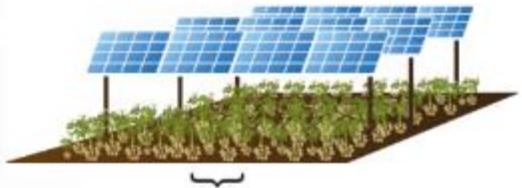
Agri-Photovoltaik

Landnutzungs-Effizienz

- Doppelnutzung
- Vorteile für einige Pflanzenarten



100 % Kartoffeln and 100 % Solarenergie



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



Agenda

1 Das Fraunhofer ISE

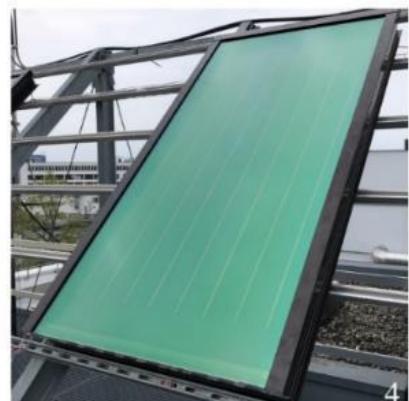
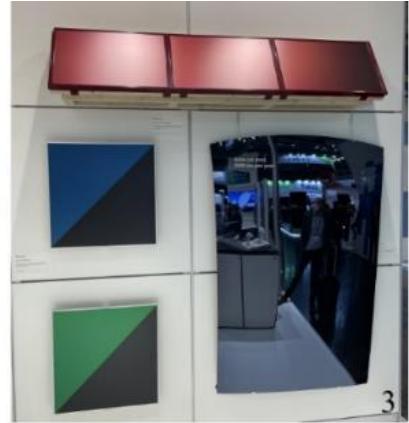
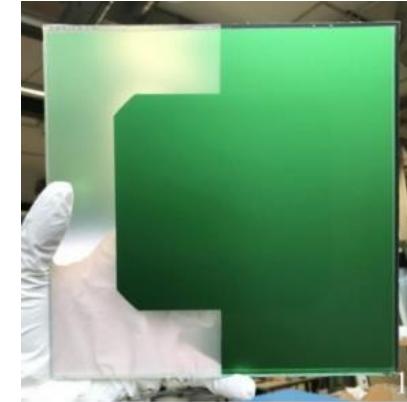
2 Motivation und Einführung

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

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



 **Fraunhofer**
ISE

universität freiburg