

# Solarstrom als Pfeiler des Energiewandels



Prof. Andreas W. Bett

Fraunhofer Institut für  
Solare Energiesysteme ISE

SolarInput, online

16. September 2021

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

# Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

## Forschen für die Energiewende



### Institutsleiter

Prof. Dr. Hans-Martin Henning

Prof. Dr. Andreas Bett

### Mitarbeitende

rund 1300

### Budget 2020

Betrieb 91,1 Mio. EUR

Investition 13,7 Mio. EUR

---

Gesamt 104,8 Mio. EUR

# Fraunhofer ISE

## Leistungsspektrum der Auftragsforschung



# Fraunhofer ISE

## Themenschwerpunkte

### ENERGIETECHNOLOGIEN UND -SYSTEME

Energieeffiziente Gebäude



Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse



Wasserstofftechnologien und Elektrische Energiespeicher

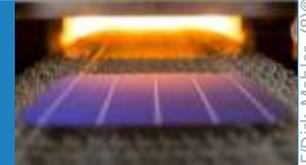


Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme



### PHOTOVOLTAIK

Silicium-Photovoltaik



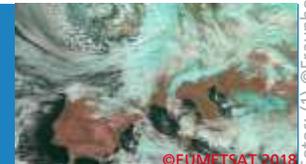
III-V- und Konzentrator-Photovoltaik



Neuartige Photovoltaik-Technologien



Photovoltaische Module und Kraftwerke



---

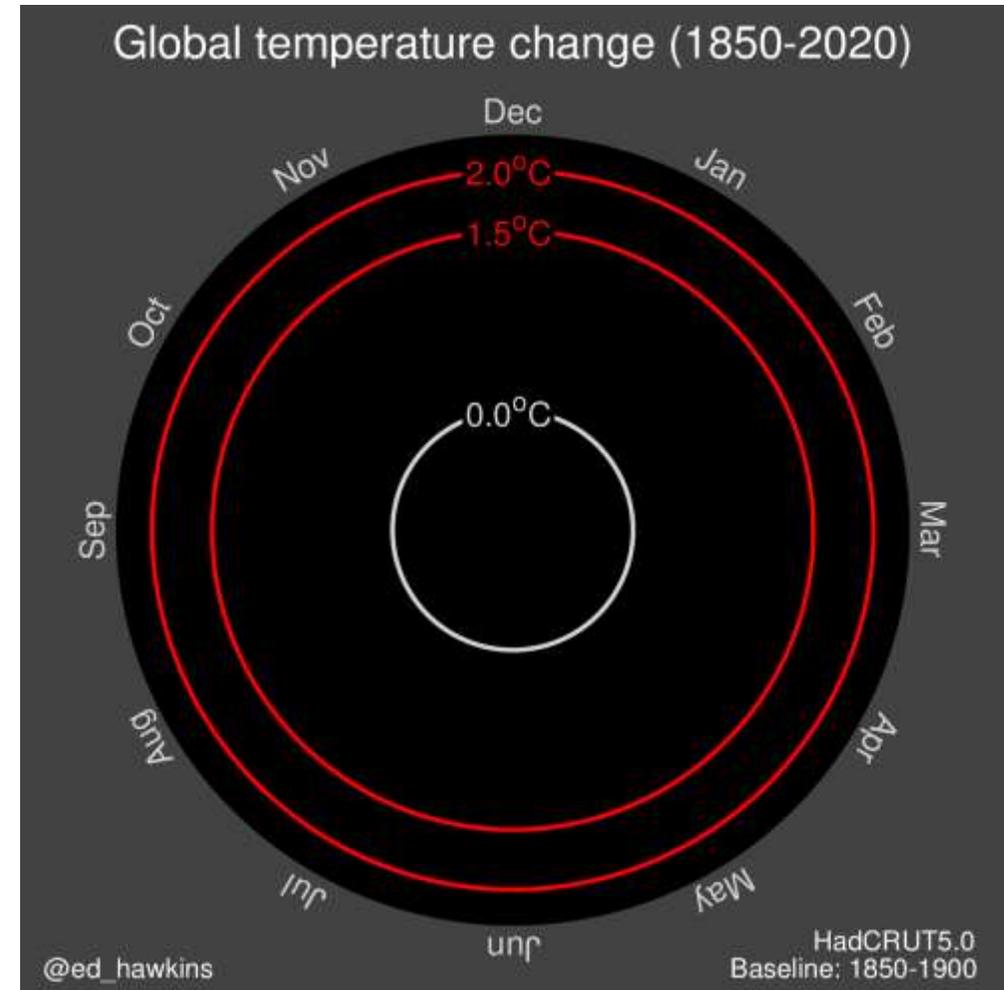
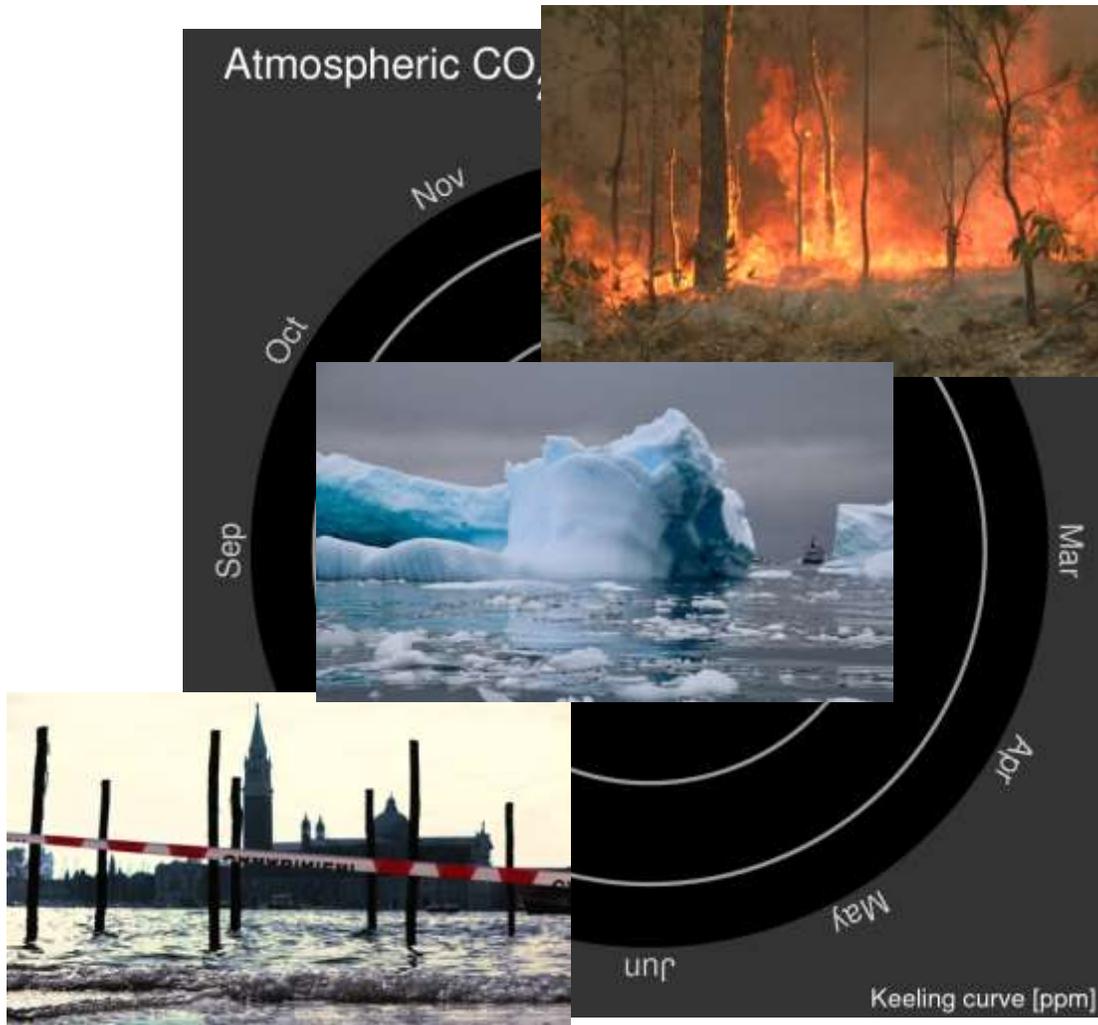
# AGENDA

## SOLARSTROM ALS PFEILER DER ENERGIEWENDE

---

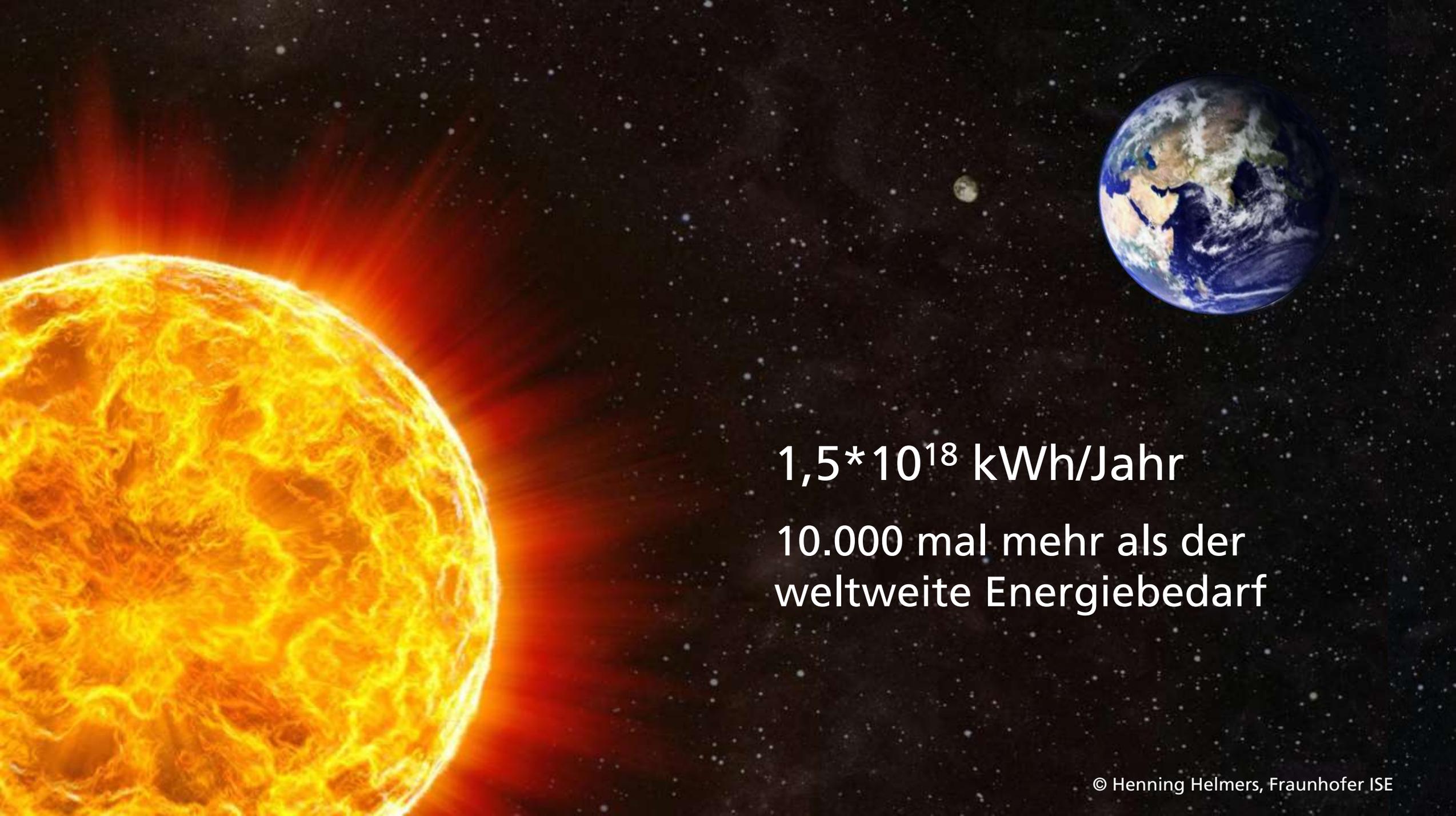
- Einführung und Motivation
- Energiewende: Was bedeutet dies?
  - Energiesystem-Modellierung und daraus ableitbare Erkenntnisse
- Photovoltaik
  - Status in der Solarzellenforschung
  - Einen Blick auf Europa und PV-Technologie
  - Neues Narrative: »Photovoltaik Überall«

# CO<sub>2</sub> Entwicklung und Auswirkungen auf die Temperaturerhöhung

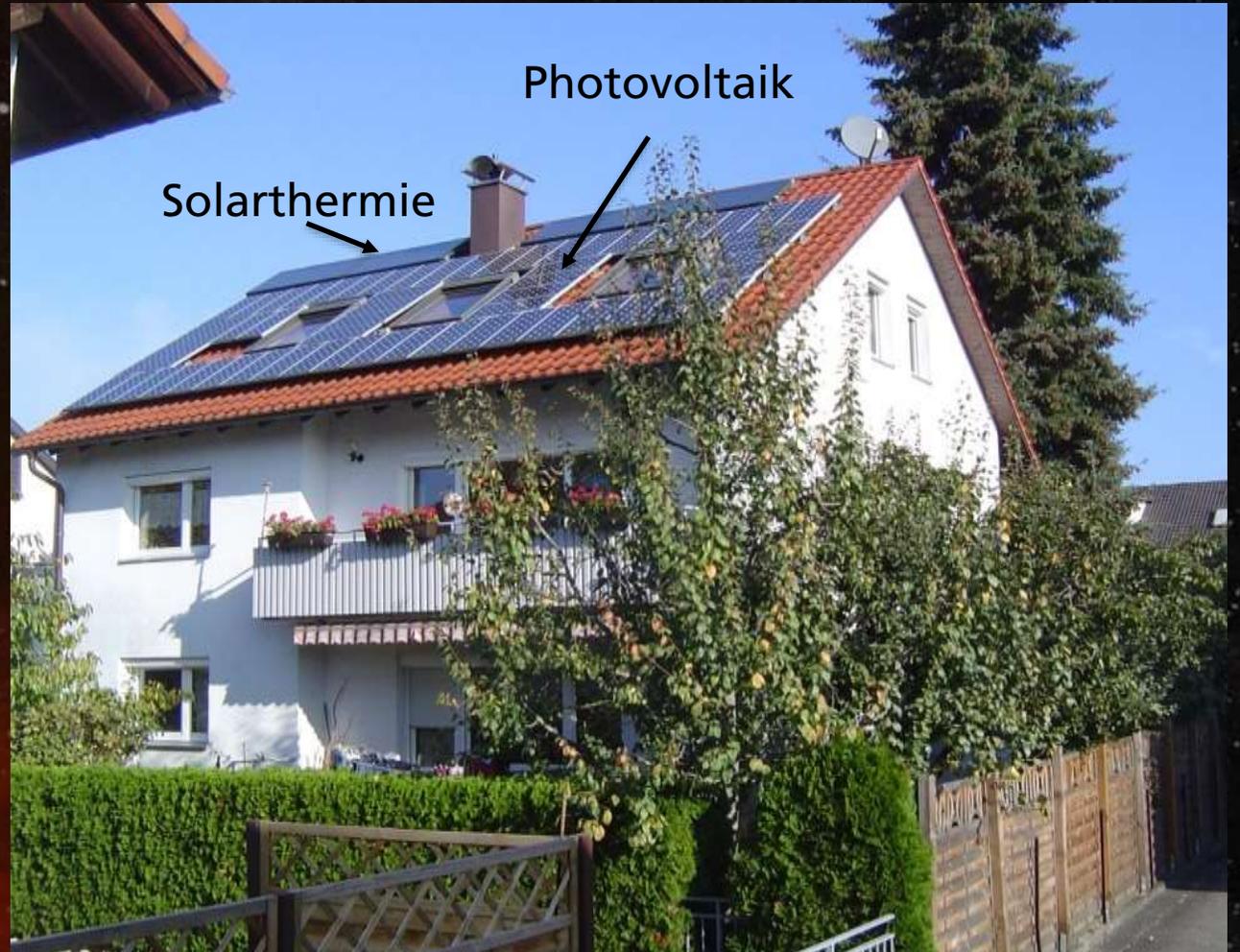


# Die Energiewende ist notwendig

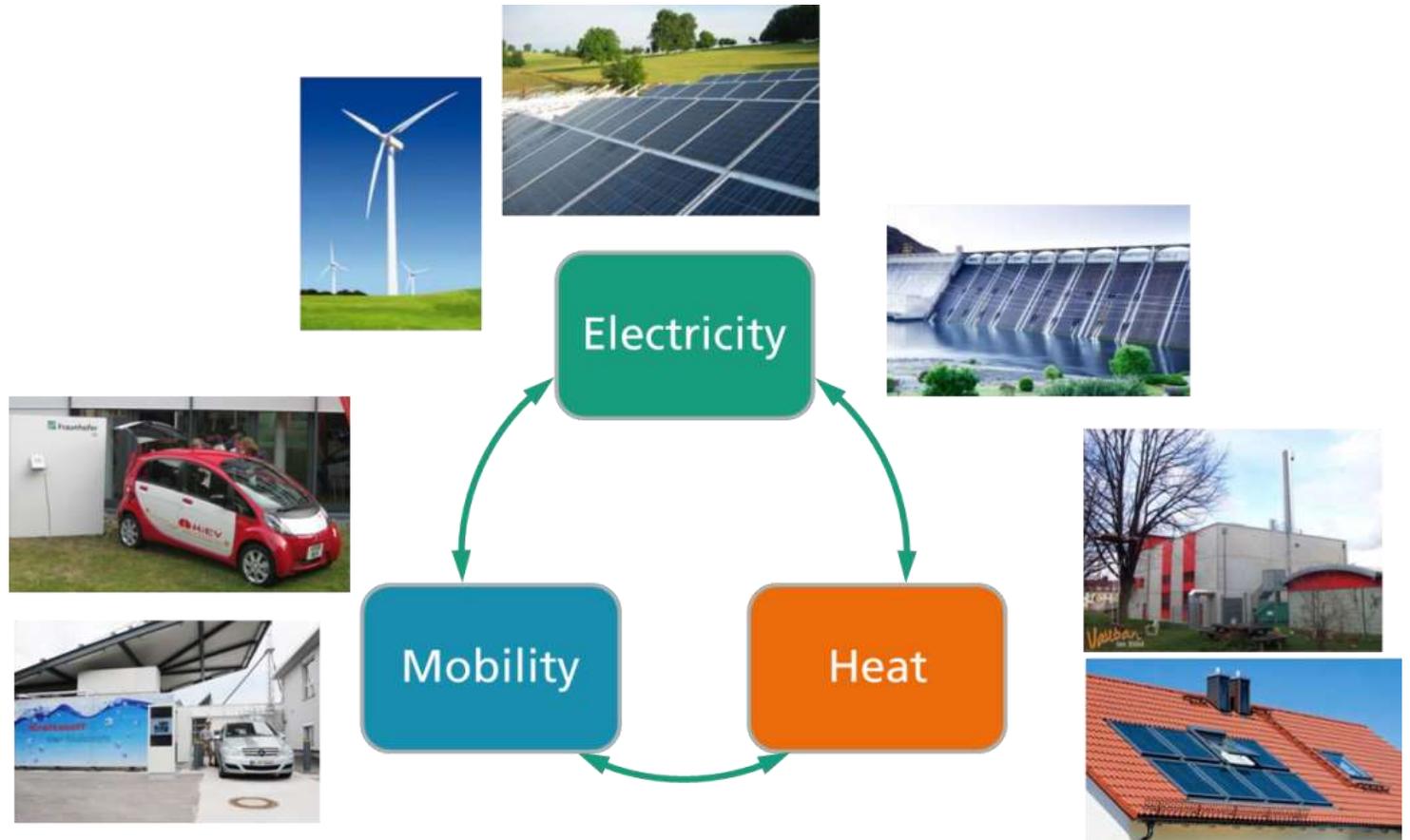




$1,5 \cdot 10^{18}$  kWh/Jahr  
10.000 mal mehr als der  
weltweite Energiebedarf



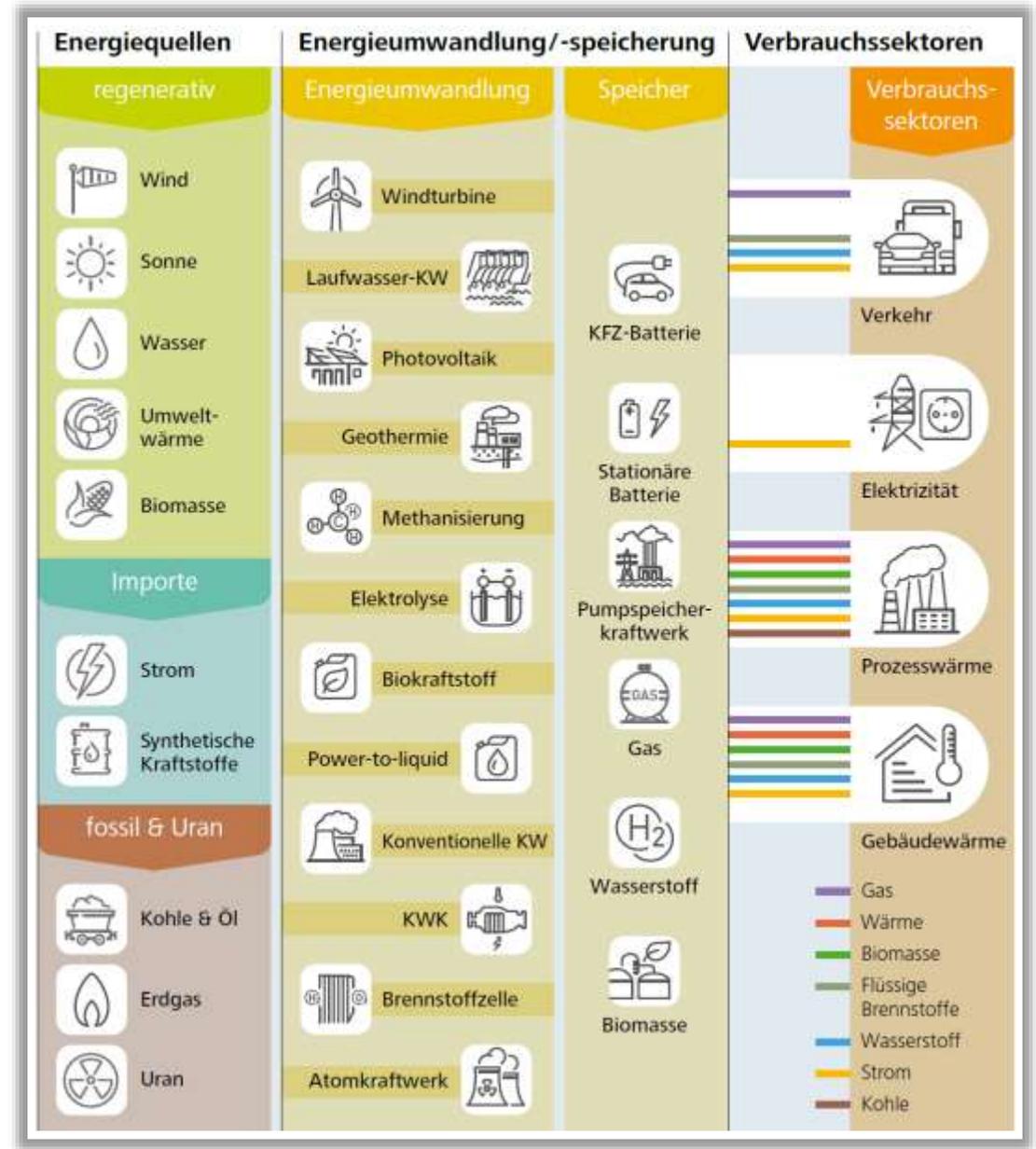
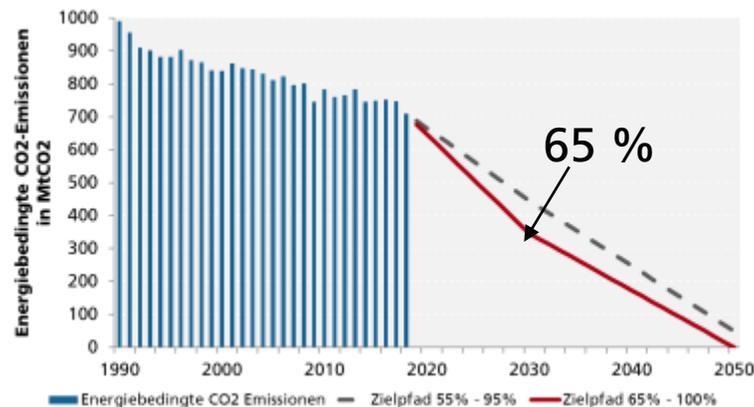
# Szenarien-Rechnungen für Deutschland am Fraunhofer ISE CO<sub>2</sub>-Reduktion in allen Sektoren notwendig!



# Systemanalyse – Methodik

## Energiesystemmodell REMod

- **Modell zur Simulation und Optimierung der Entwicklung nationaler Energiesysteme**
  - Einbeziehung aller Verbrauchssektoren und Energieträger
  - Minimierung der Transformationskosten
  - stundengenaue Modellierung



# Systemanalyse – Methodik

## Annahmen

### Referenz 55/95

kosten-  
optimaler  
Pfad

- In 2030 55 % CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion
- In 2050 95 % CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion

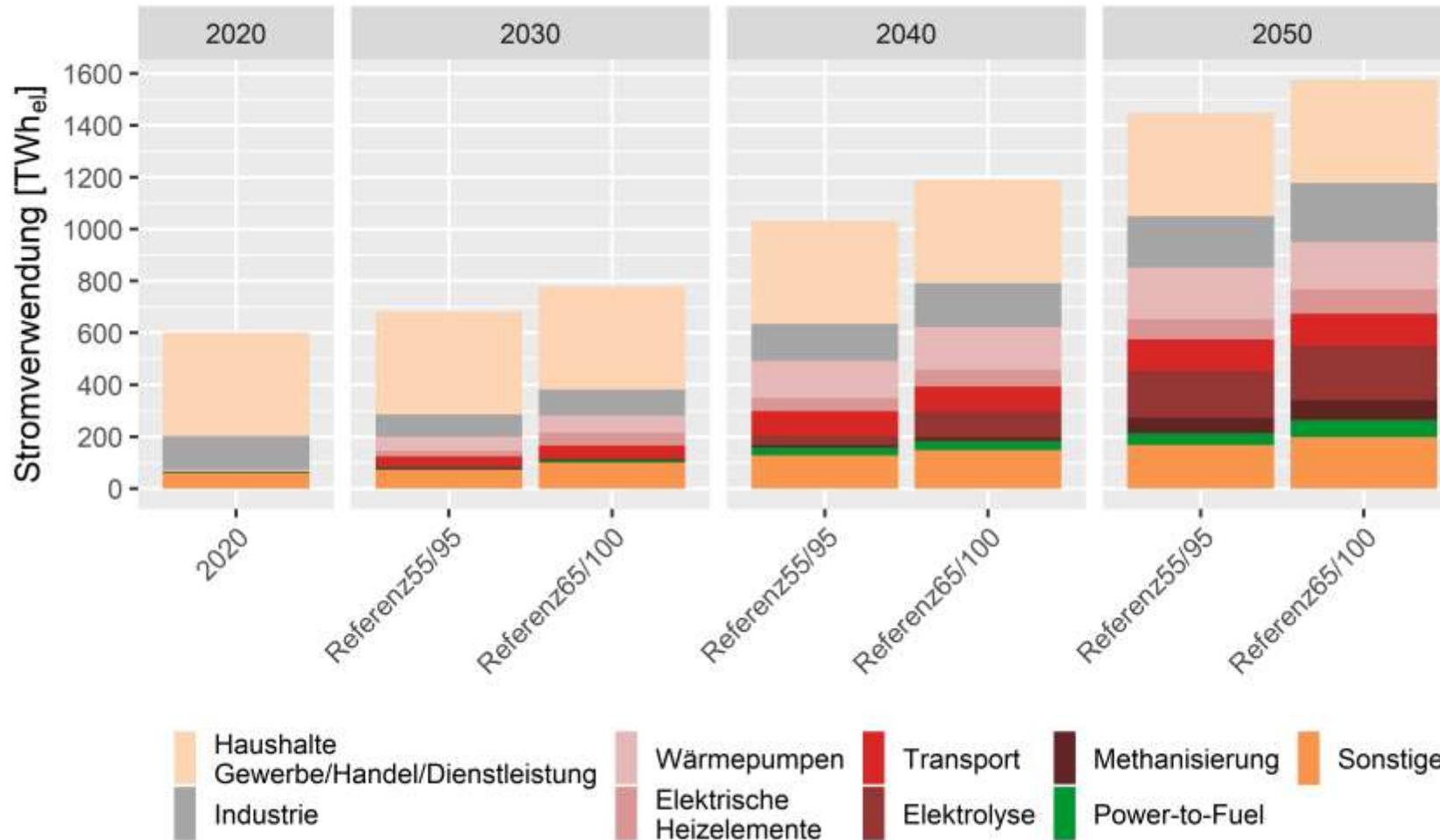
### Zielverschärfung 65/100

kosten-  
optimaler  
Pfad

- In 2030 65 % CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion
- In 2050 100 % CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion

Zusätzliche Szenarien (u.a. Suffizienz)

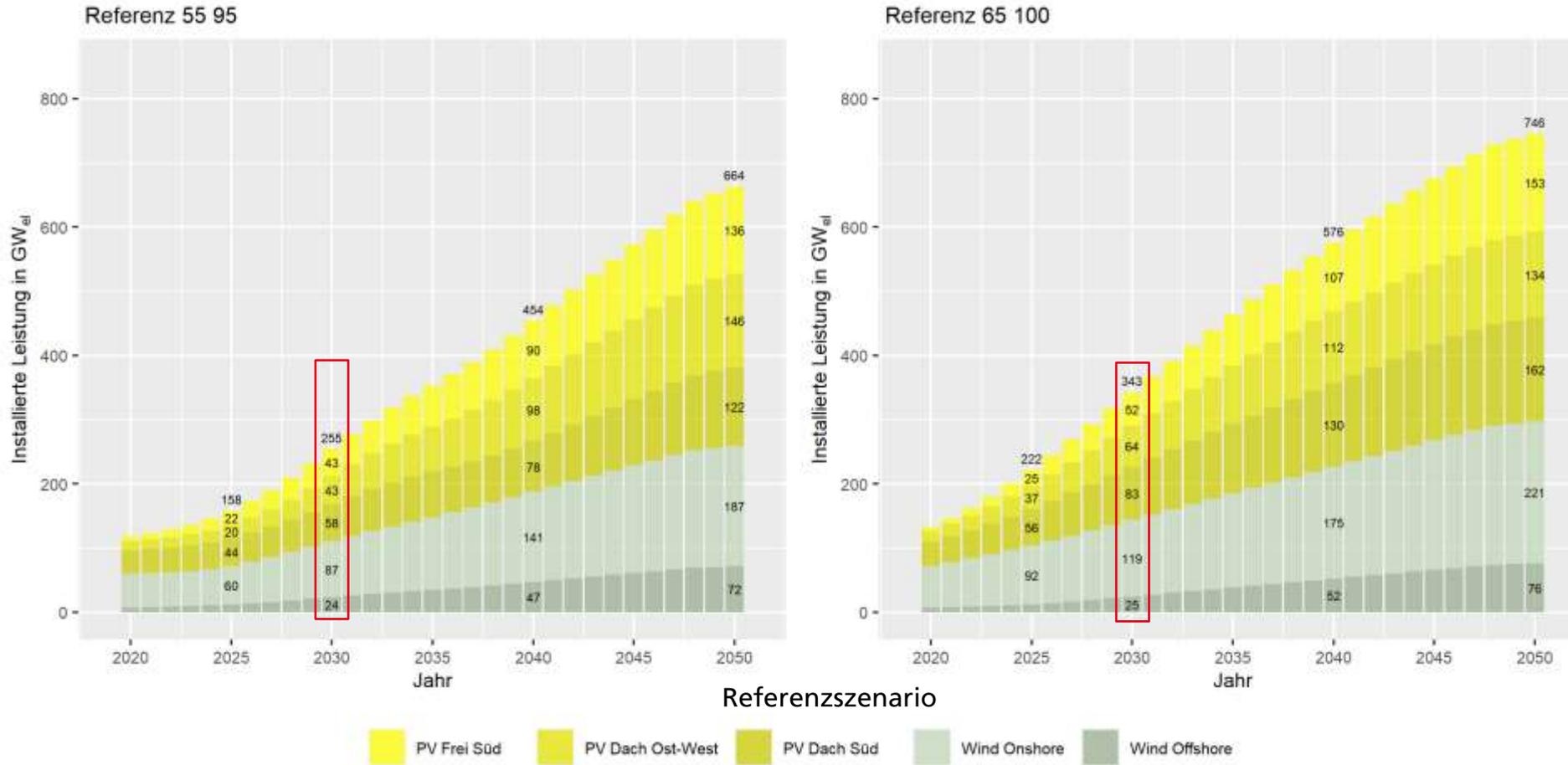
# Der Strombedarf steigt von 600 TWh bis ins Jahr 2050 auf 1200 bis 1600 TWh



Ergebnis zum Bereich des Strombedarfs in 2050 für die untersuchten Szenarien mit Zielverschärfung\*

■ 1200 bis 1600 TWh

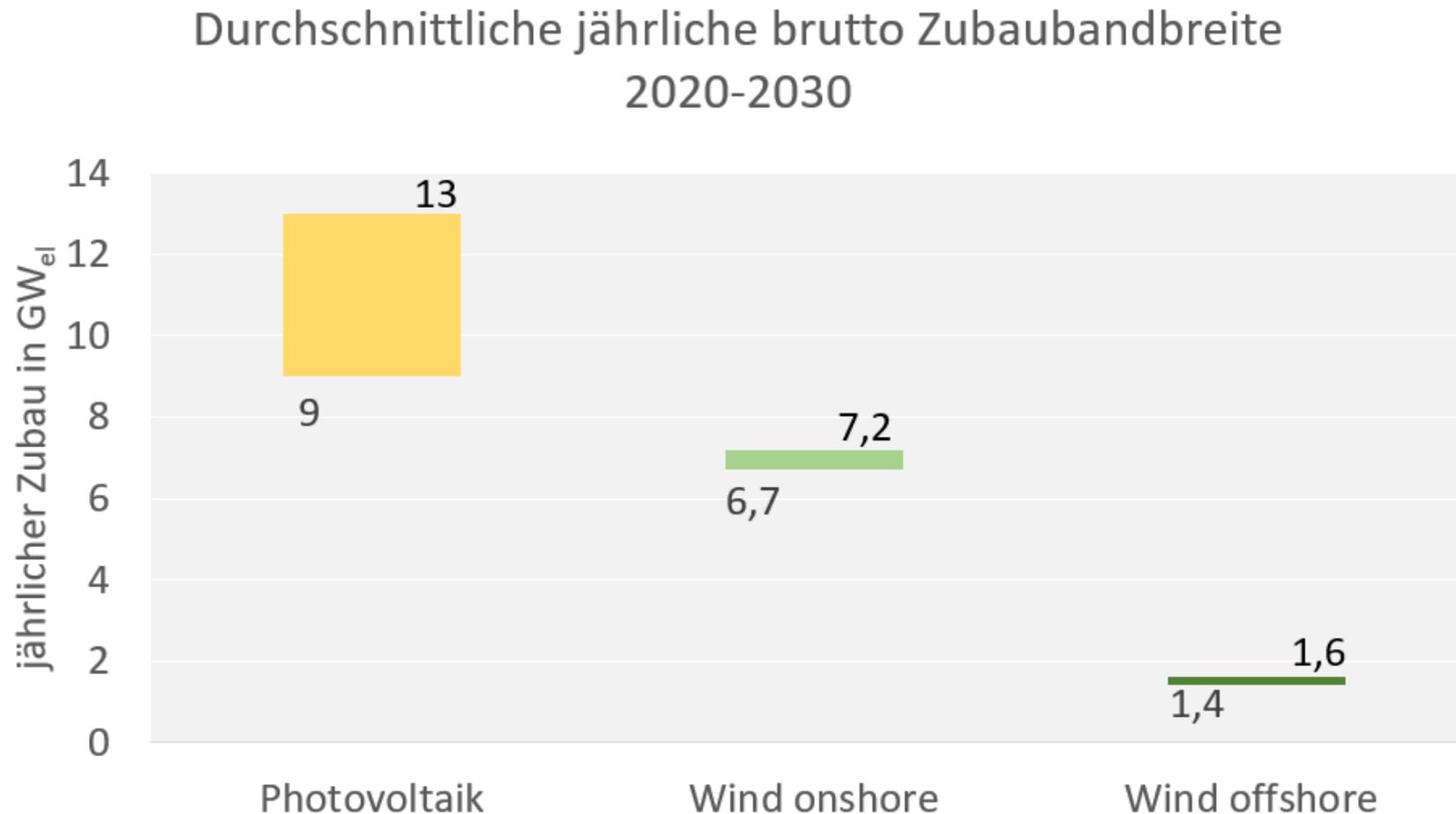
# Durch eine Zielverschärfung (65 % in Deutschland im Jahr 2030) steigt die benötigte installierte Leistung von Solar etwa um 55 GW und Wind um 30 GW an



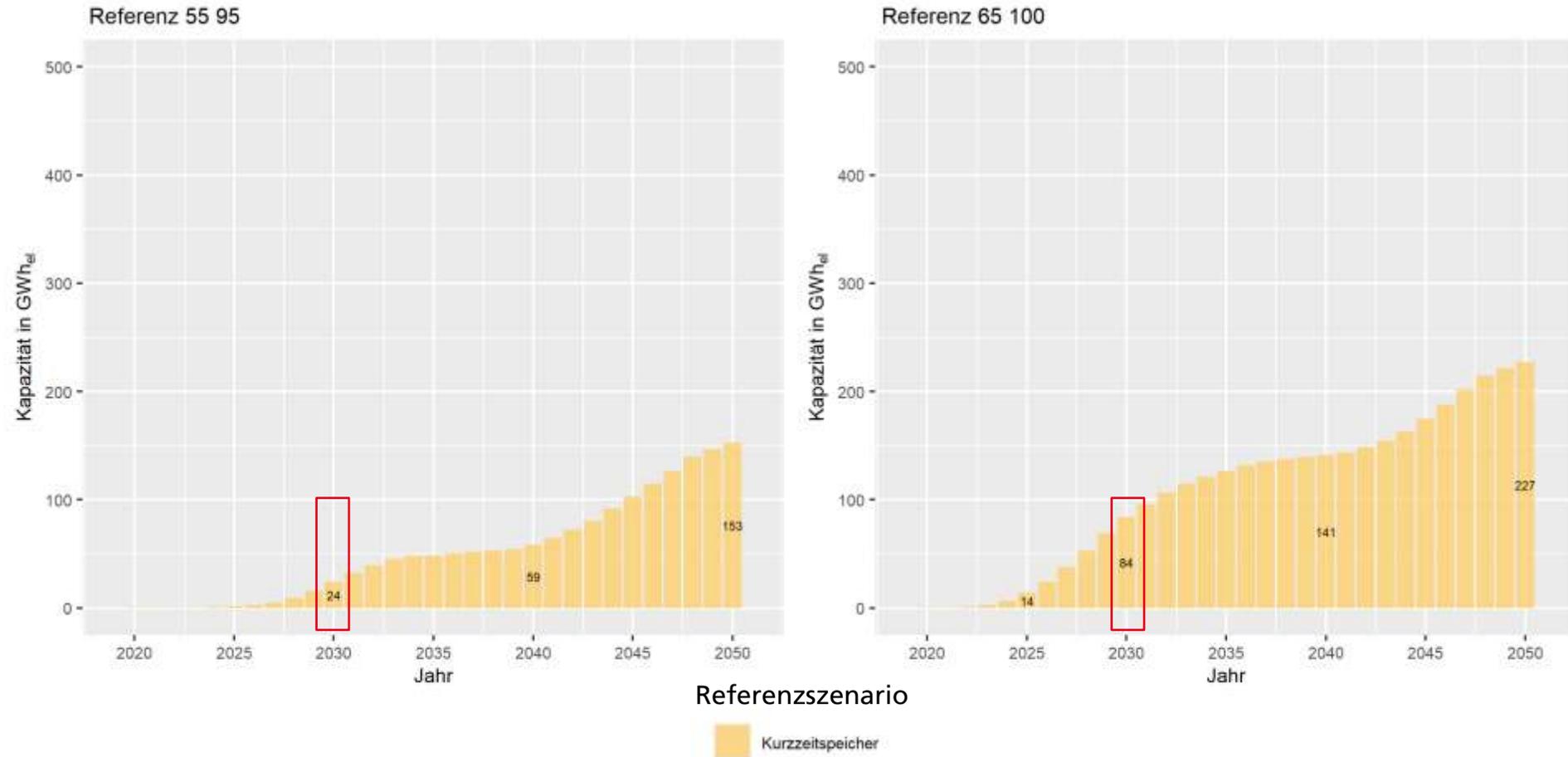
**Ergebnis zum Intervall mit Zielverschärfung in 2030**

- Photovoltaik 155 - 200 GW
- Wind Onshore 110 - 120 GW
- Wind Offshore 22 - 25 GW

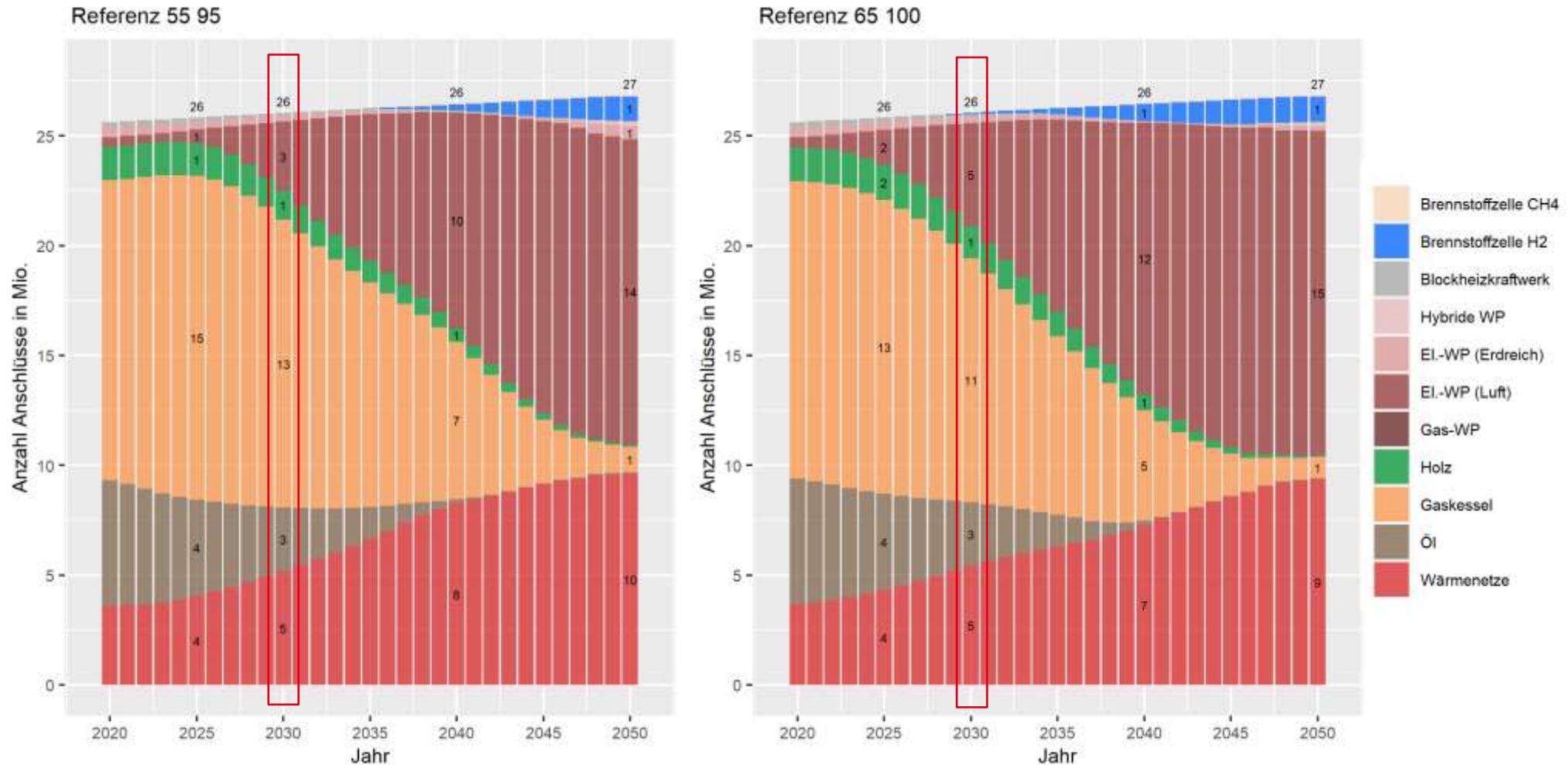
# Jährlich müssen so bis 2030 im Mittel etwa 9 GW Wind und 13 GW PV installiert werden (inklusive Ersatz für auslaufende Anlagen)



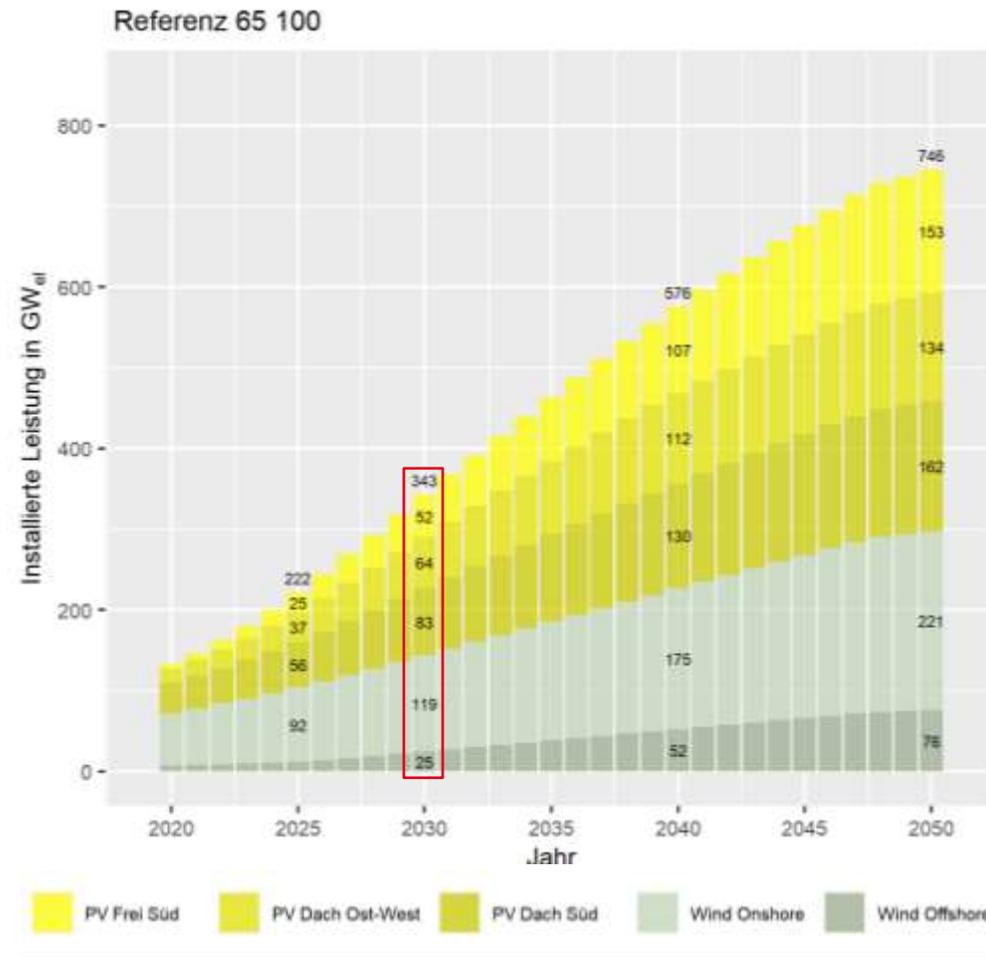
# Als Flexibilität werden bis zum Jahr 2030 etwa 60 GWh mehr Kurzzeitspeicher notwendig



# Wärmepumpen müssen ab sofort zur Schlüsseltechnologie in der Wärme werden. Auch Fernwärme spielt eine wichtige Rolle.



# PV-Bedarf in Deutschland



**Ergebnis zum Intervall mit Zielverschärfung in 2030**

- Photovoltaik 155 - 200 GW
- Wind Onshore 110 - 120 GW
- Wind Offshore 22 - 25 GW

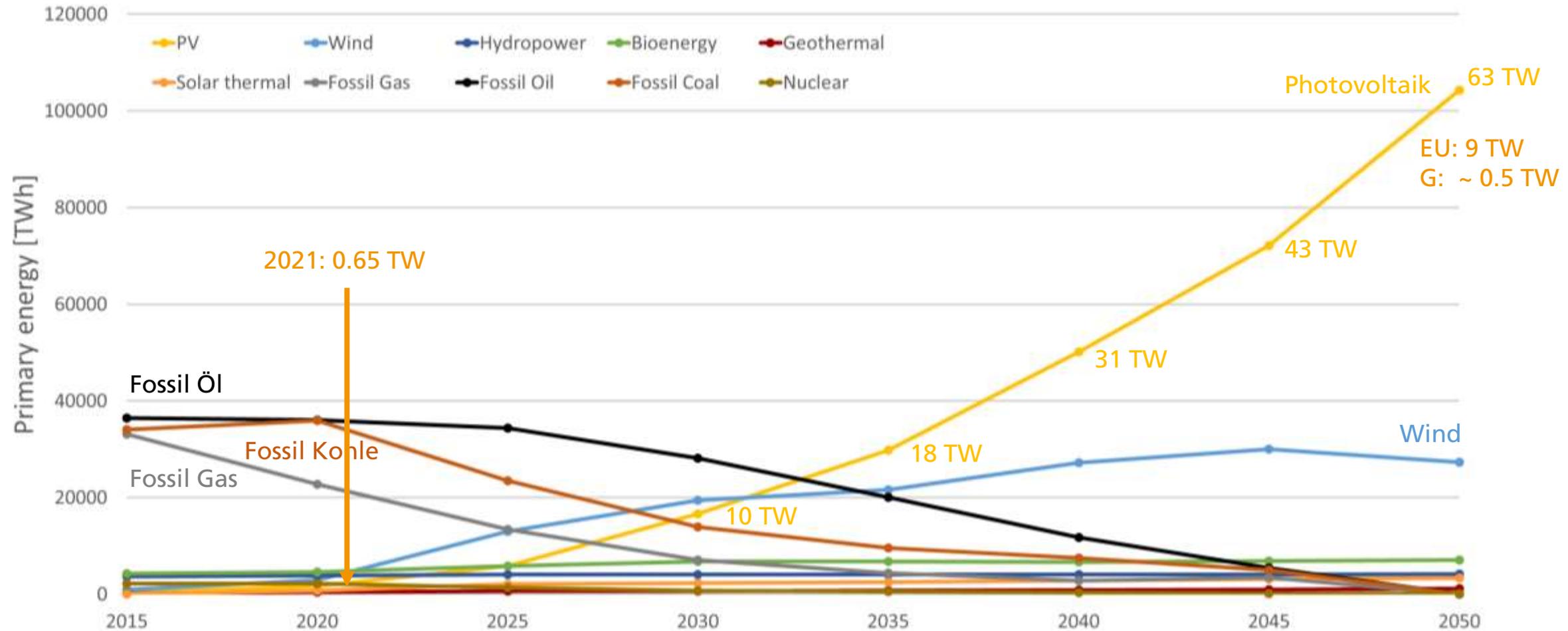
# Das Gebäude zur Energiewende

## Werte für Deutschland



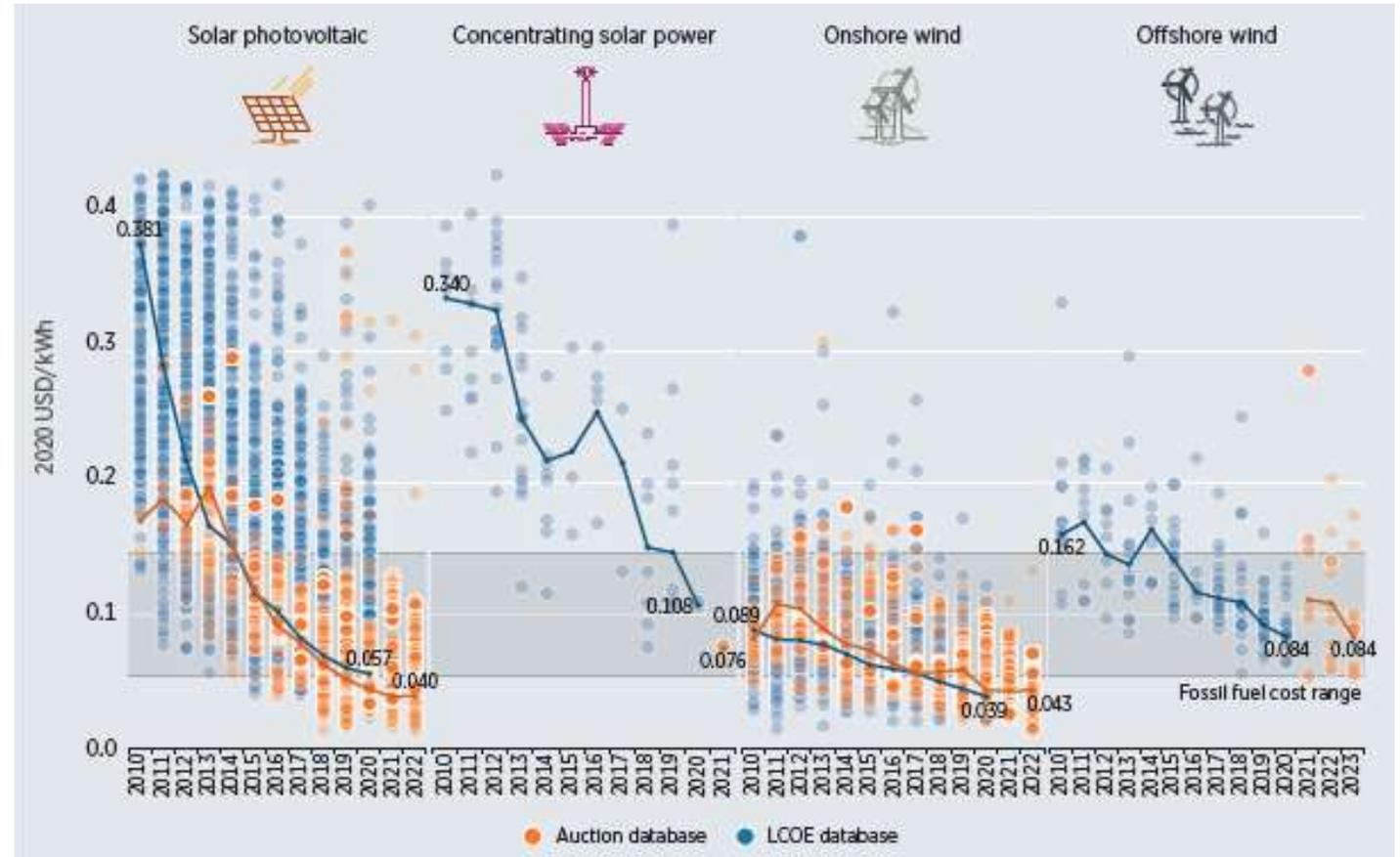
# Die globale Energiewende: CO<sub>2</sub>-frei in 2050

## Photovoltaik: Riesige Mengen sind erforderlich!



# Die gute Nachricht: Photovoltaik stellt heute Energie am kostengünstigsten zur Verfügung!

- Reduktion der Kosten für die kW installierte Leistung von 2010 bis 2020 um 80 %
- weltweit schon PPAs unter 1,4 ¢cent/kWh
- in Deutschland zwischen 4,3 – 5,5 ¢cent/kWh



---

# AGENDA

---

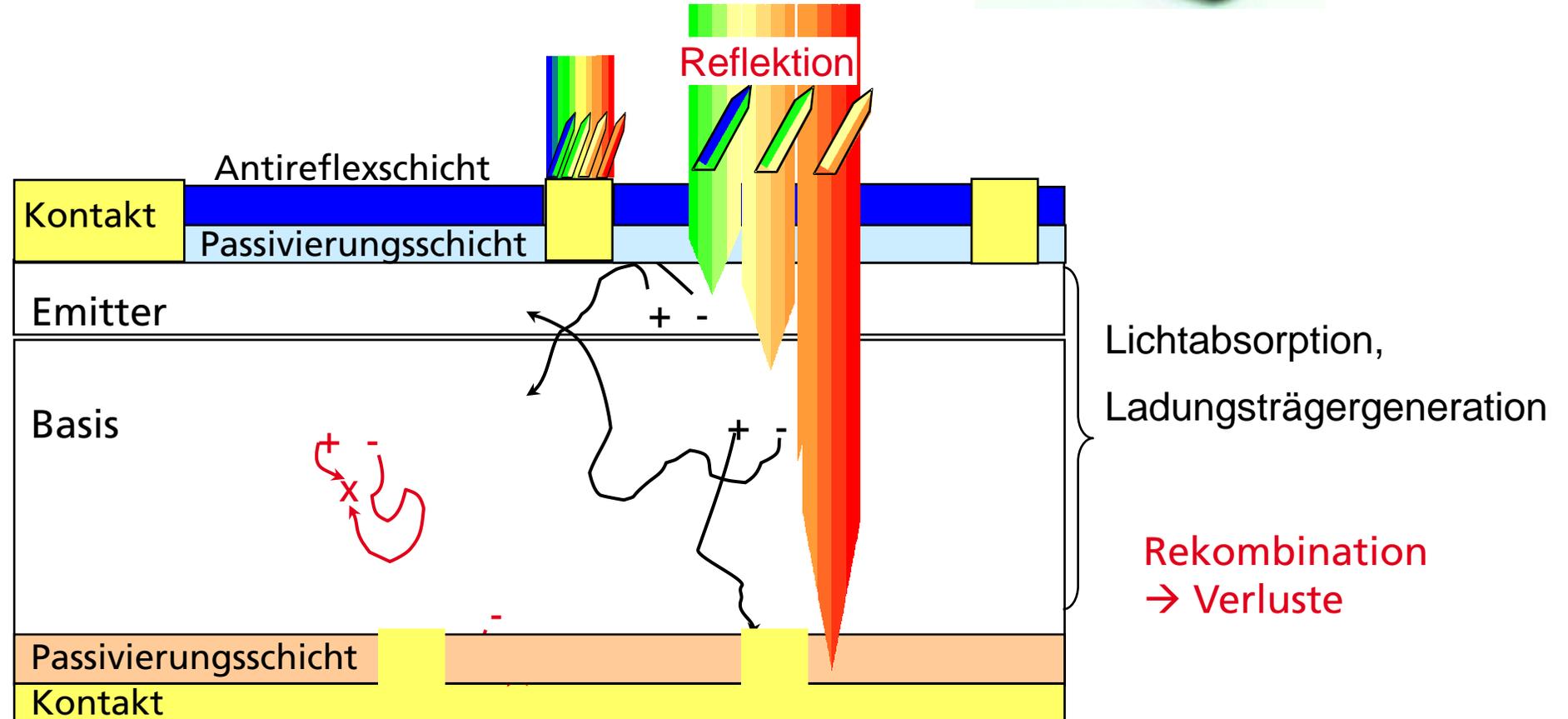
- Einführung und Motivation
- Energiewende: Was bedeutet dies?
  - Energiesystem-Modellierung und daraus ableitbare Erkenntnisse
- Photovoltaik
  - Status in der Solarzellenforschung
  - Ein Blick auf Europa und PV-Technologie
  - Neues Narrative: »Photovoltaik Überall«

# Der »Motor« der Photovoltaik: die Solarzelle

## Ziel: Verluste minimieren!

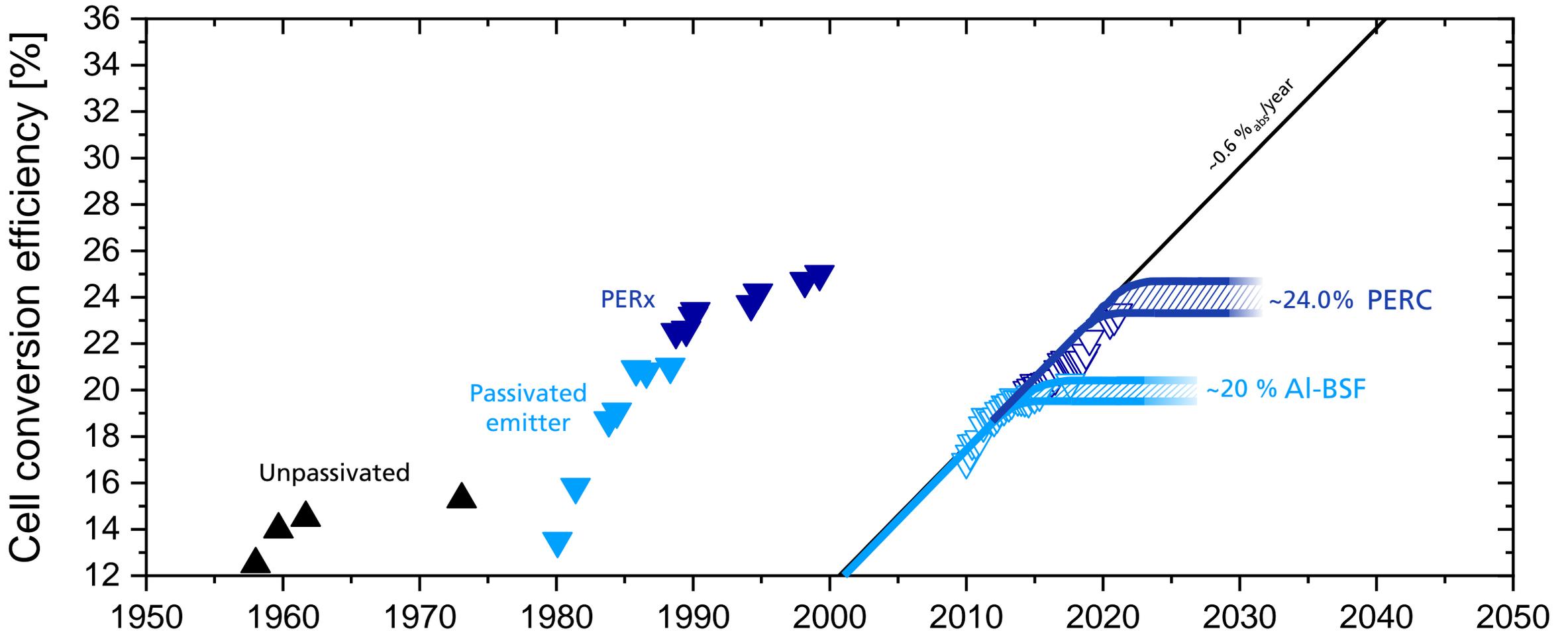


- Sonnenlicht wird im Halbleiter (Silicium) absorbiert
- Ladungsträger (Elektronen und Löcher) werden erzeugt und den Kontakten zugeführt



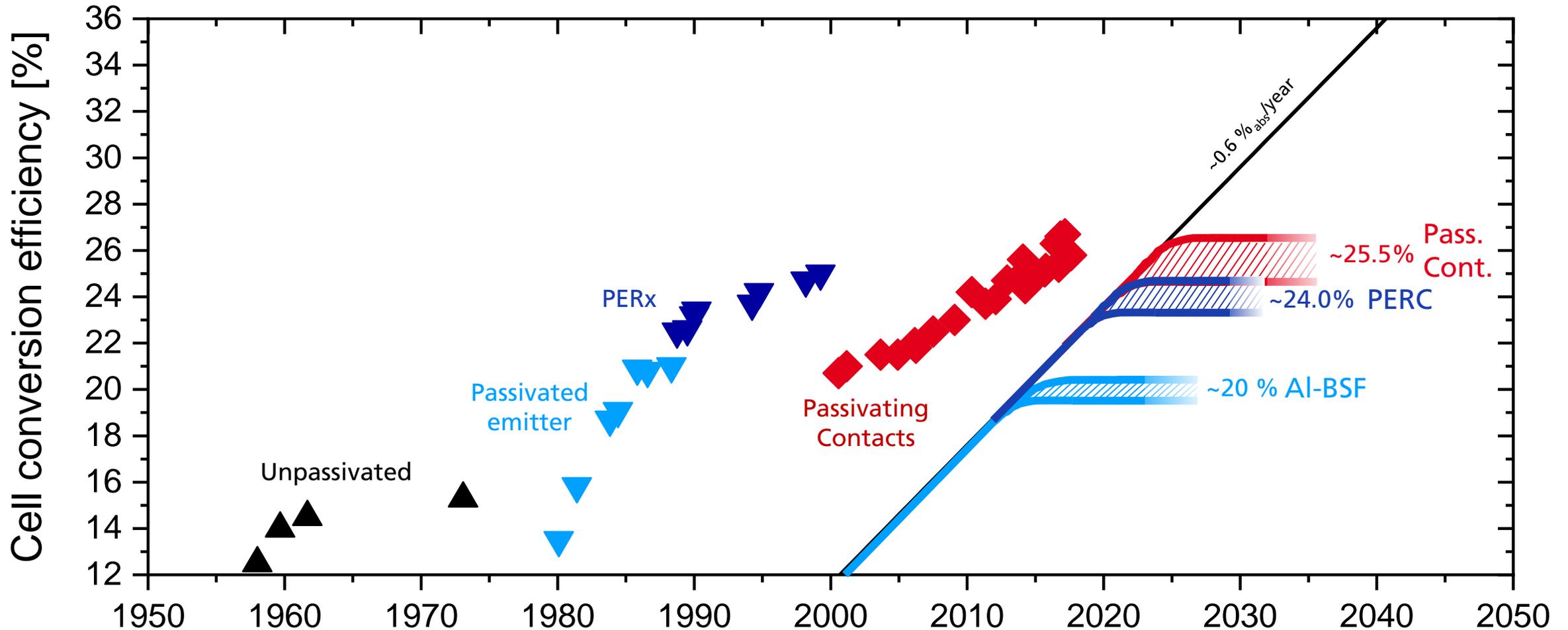
# Entwicklung der Photovoltaik Technologie

## Laborrekorde und Dauer des Transfers in ein industrielles Produkt



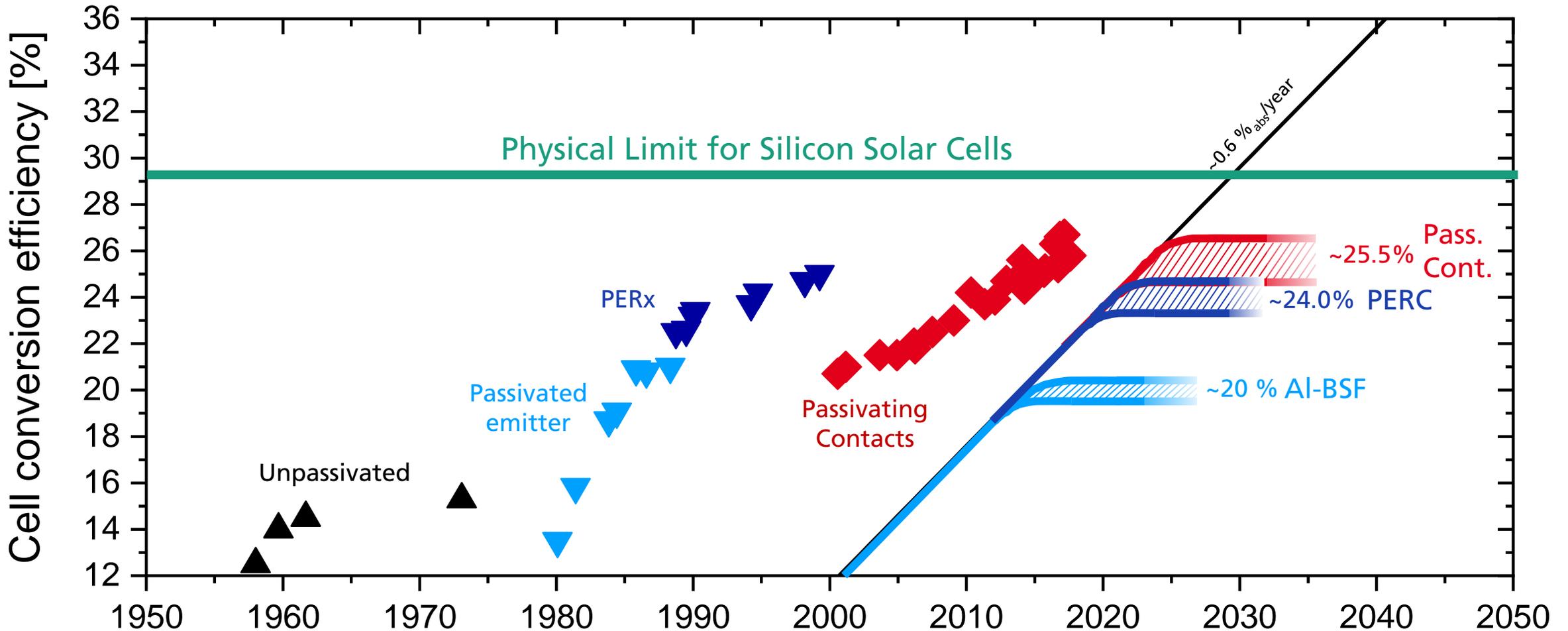
# Entwicklung der Photovoltaik Technologie

## Was kommt als Nächstes?

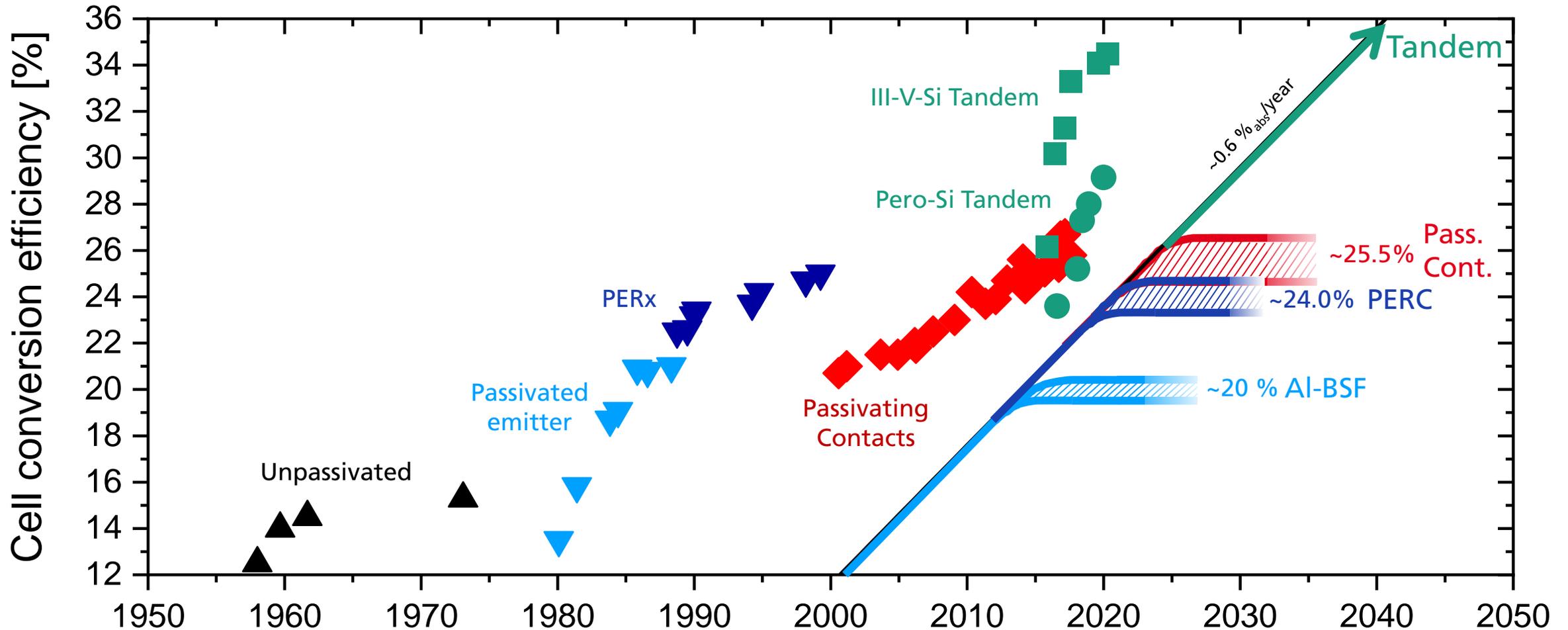


# Entwicklung der Photovoltaik Technologie

## Was kommt als Nächstes?

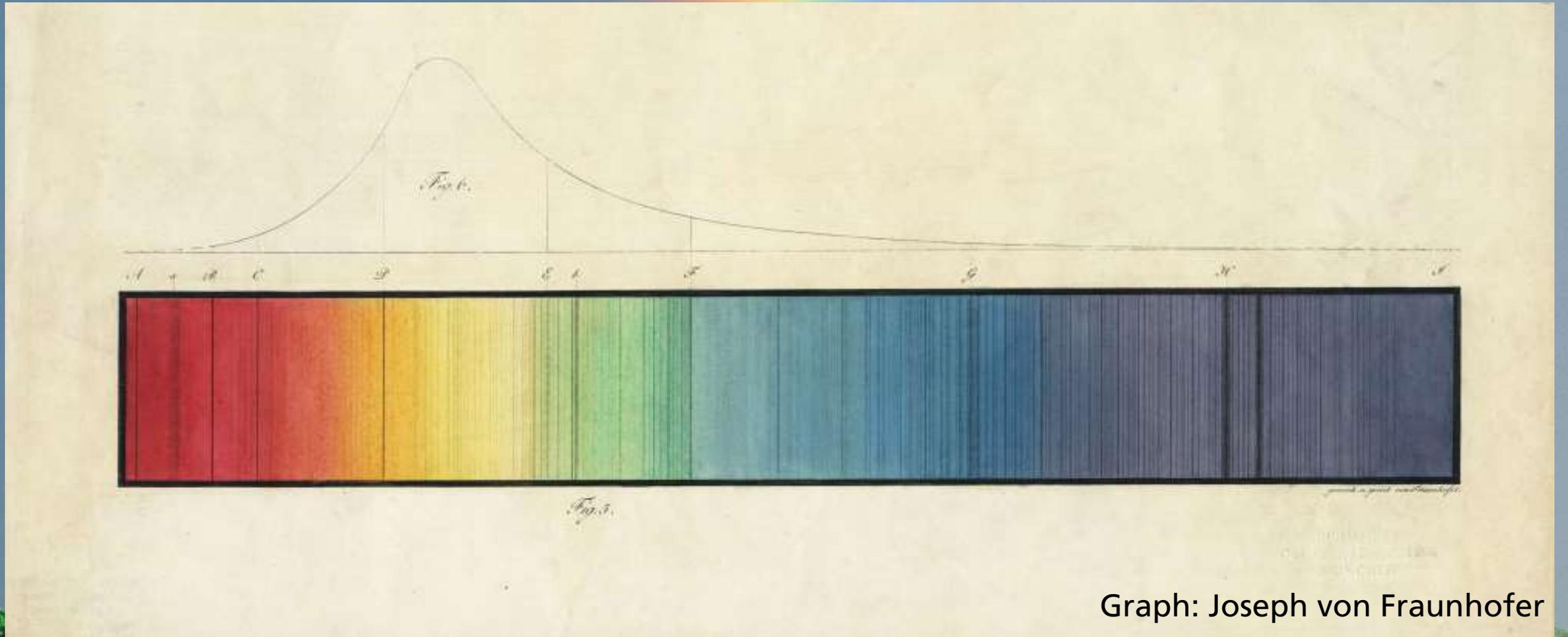


# Hohe und höchste Wirkungsgrade Tandemsolarzellen



# Warum Tandemsolarzellen?

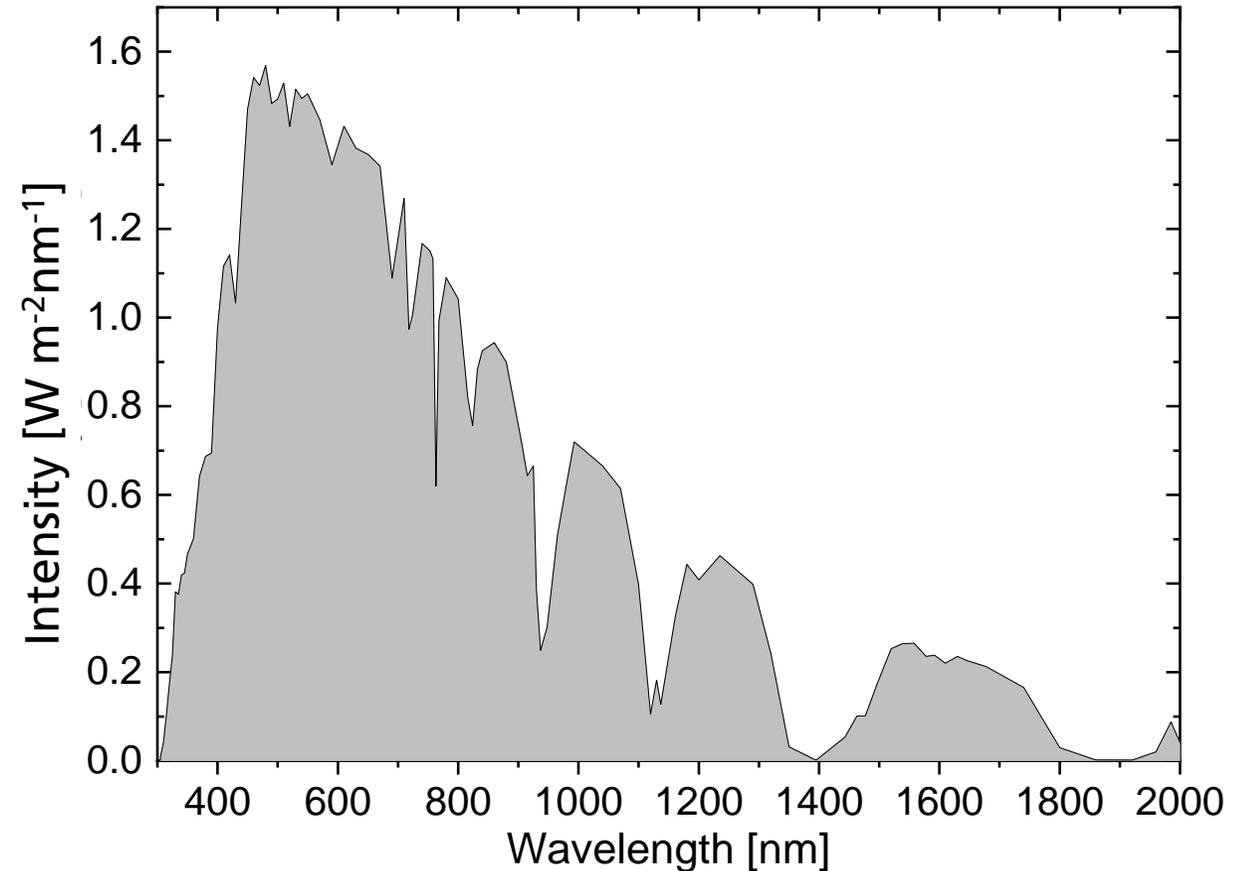
## Das Spektrum der Sonne ist breit !



Graph: Joseph von Fraunhofer

# Warum Tandemsolarzellen?

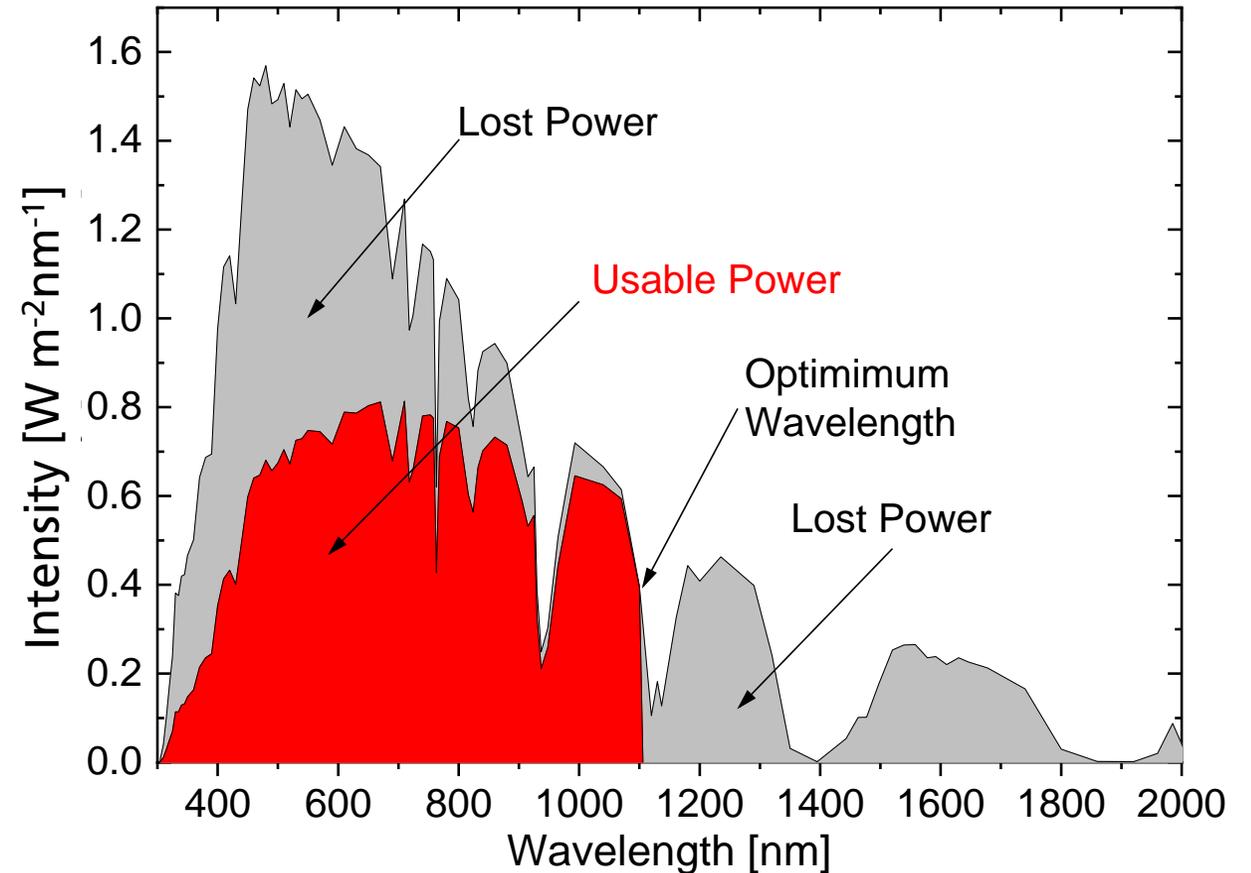
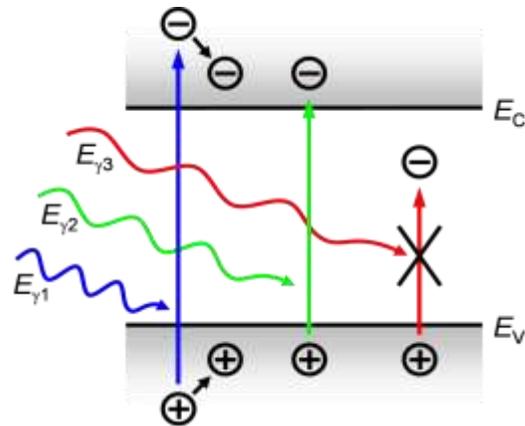
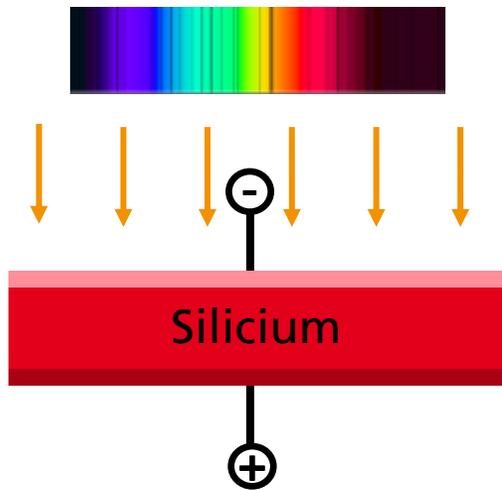
## Das Spektrum der Sonne ist breit !



# Warum Tandemsolarzellen?

## Das Spektrum der Sonne ist breit !

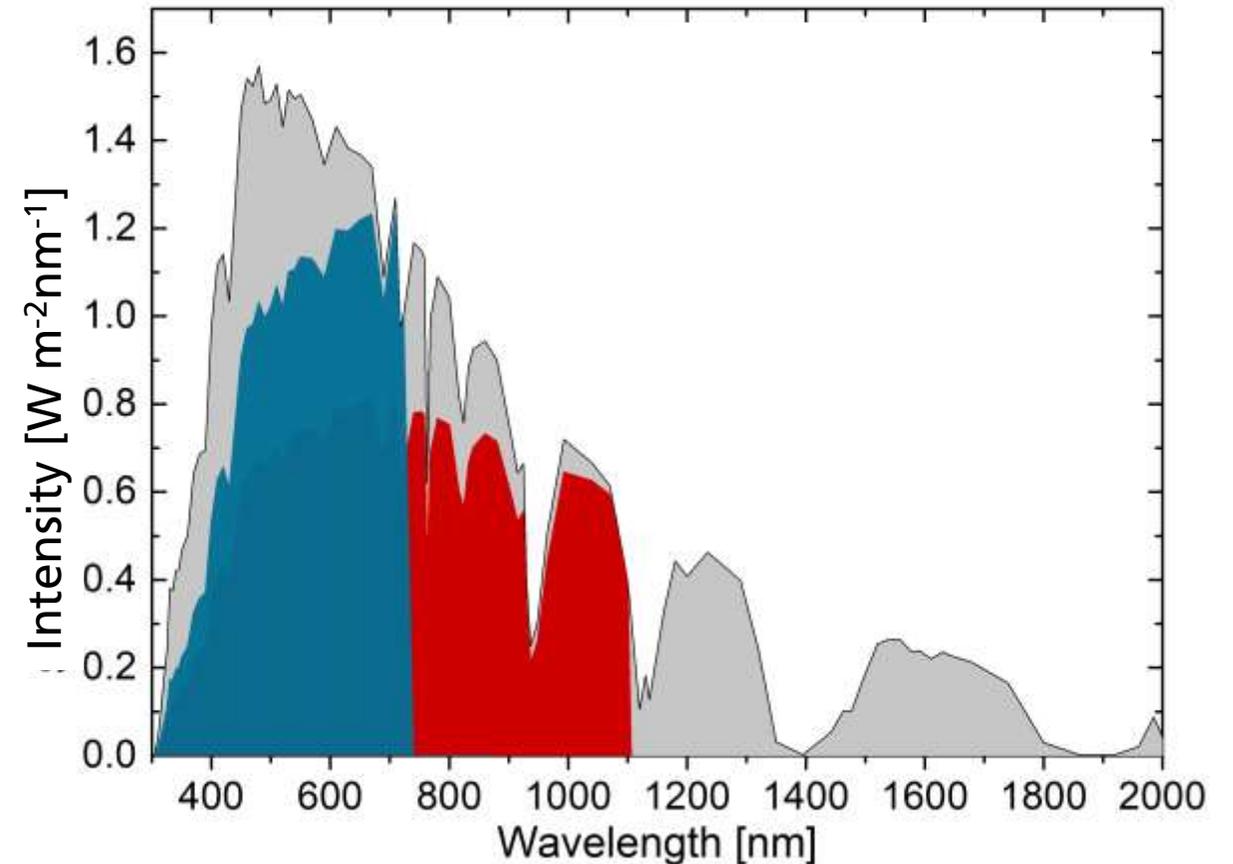
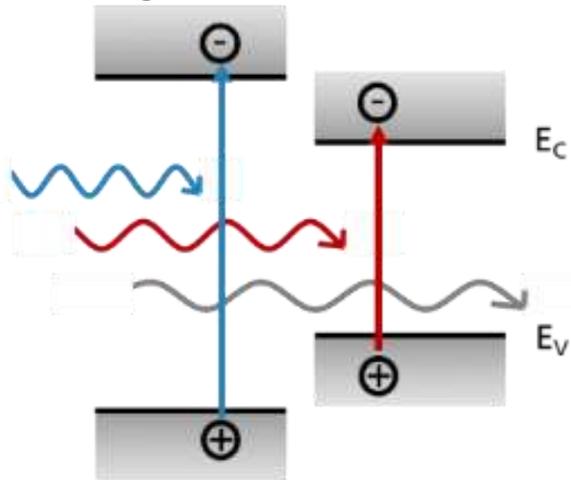
- Nur eine Wellenlänge aus dem breiten Spektrum der Sonne kann energetisch optimal in einer Solarzelle genutzt werden.



# Höhere Wirkungsgrade

## Nutzung von mehr als einem Material für Solarzellen

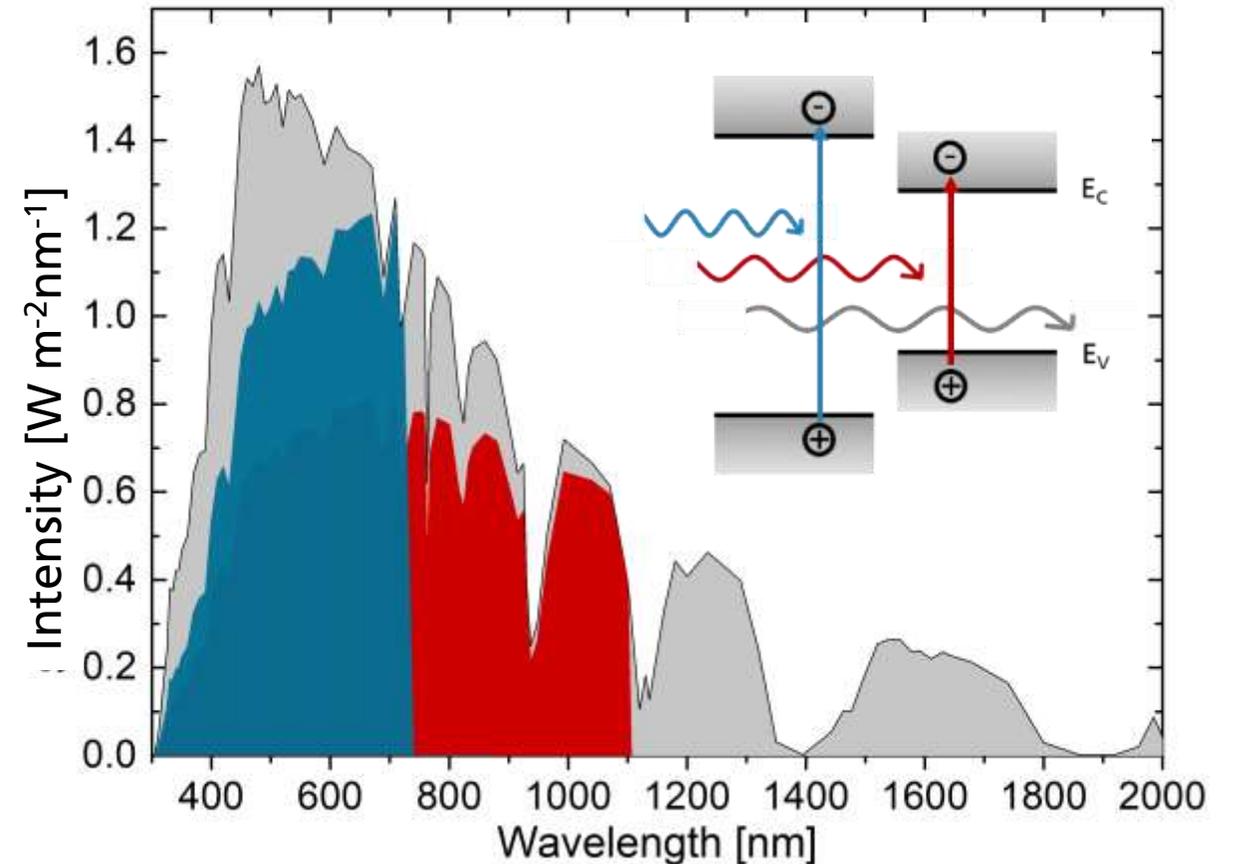
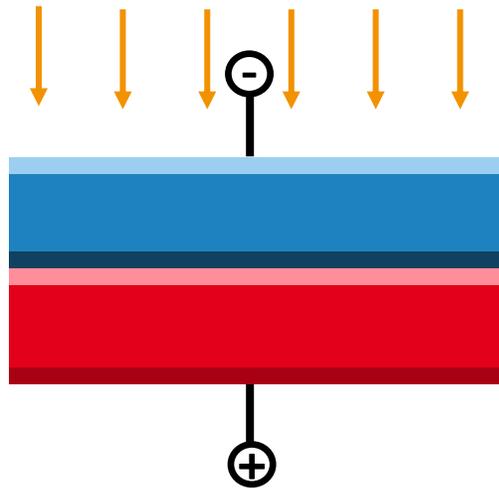
- Nur eine Wellenlänge aus dem breiten Spektrum der Sonne kann energetisch optimal in einer Solarzelle genutzt werden.
- Bei zwei Materialien für die Solarzellen, wird das Spektrum "geteilt" und besser genutzt.



# Höhere Wirkungsgrade

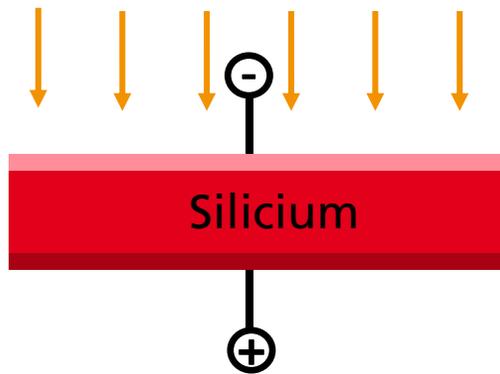
## Nutzung von mehr als einem Material für Solarzellen

- Nur eine Wellenlänge aus dem breiten Spektrum der Sonne kann energetisch optimal in einer Solarzelle genutzt werden.
- Bei zwei Materialien für die Solarzellen wird das Spektrum »geteilt« und besser genutzt.

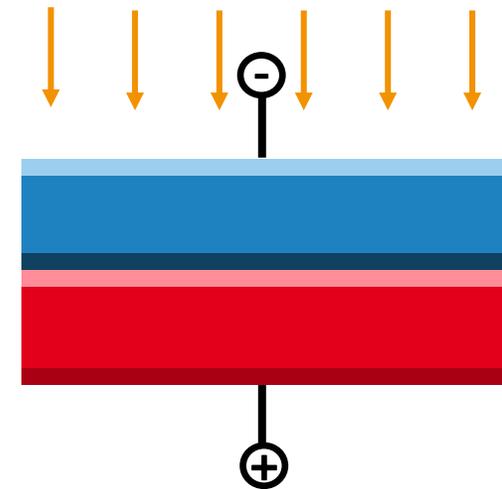


# Tandemsolarzellen als neuste Solarzellentechnologie

## Wie wird es umgesetzt?

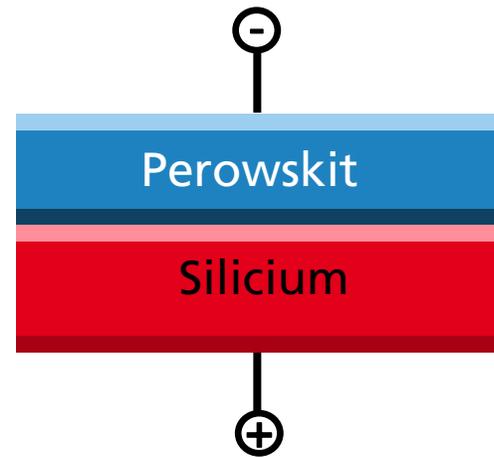
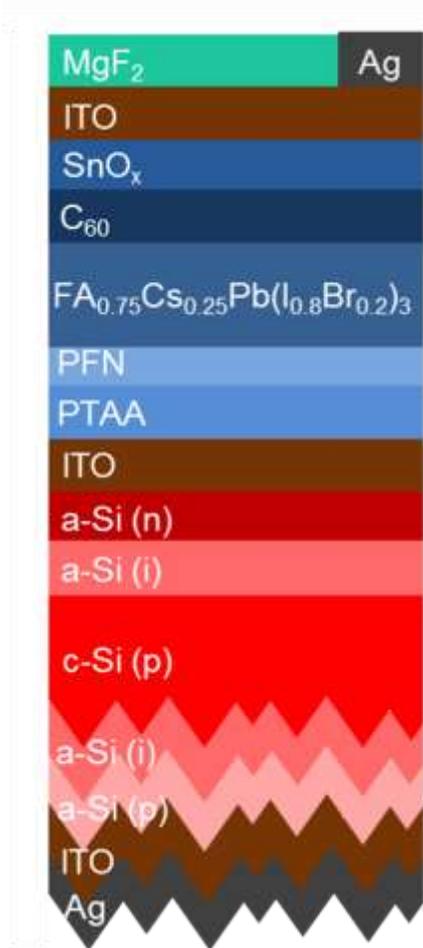


?



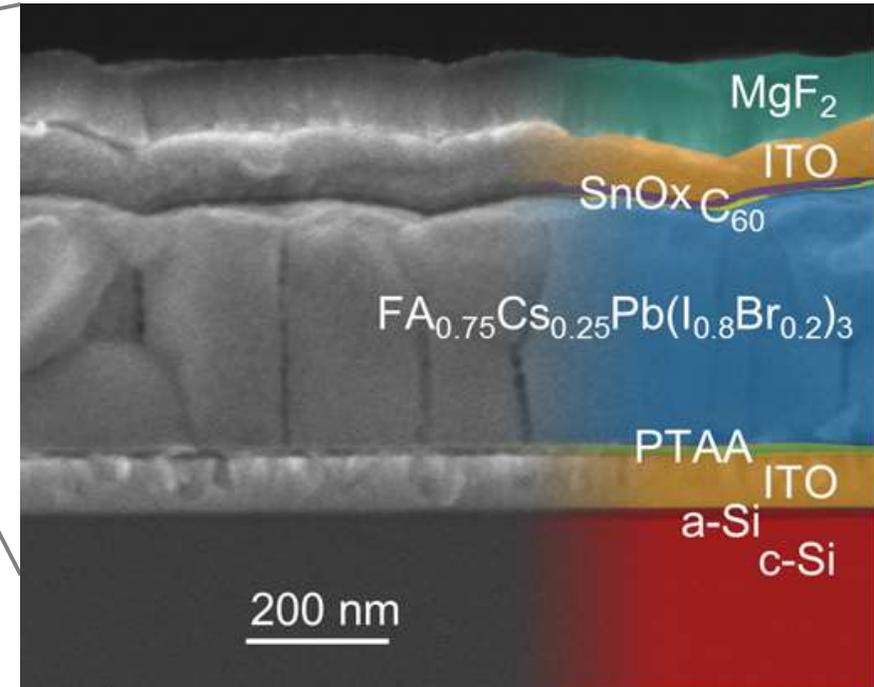
# Tandem PV

## Perowskit auf Silicium



Perowskit Solarzelle

Silicium Solarzelle

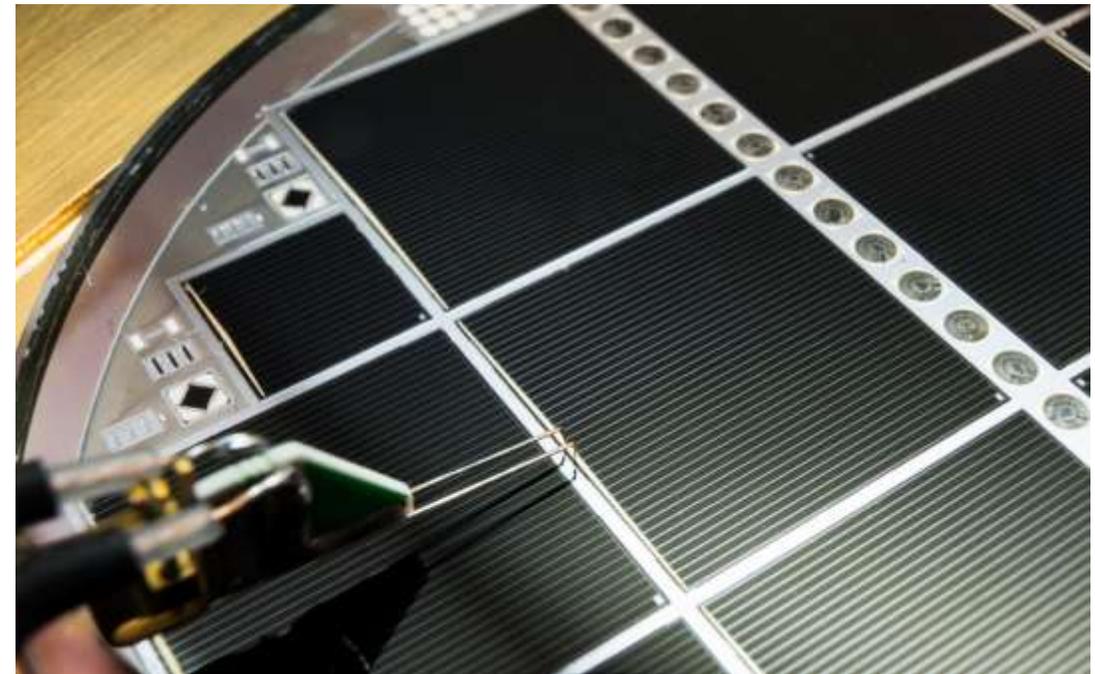
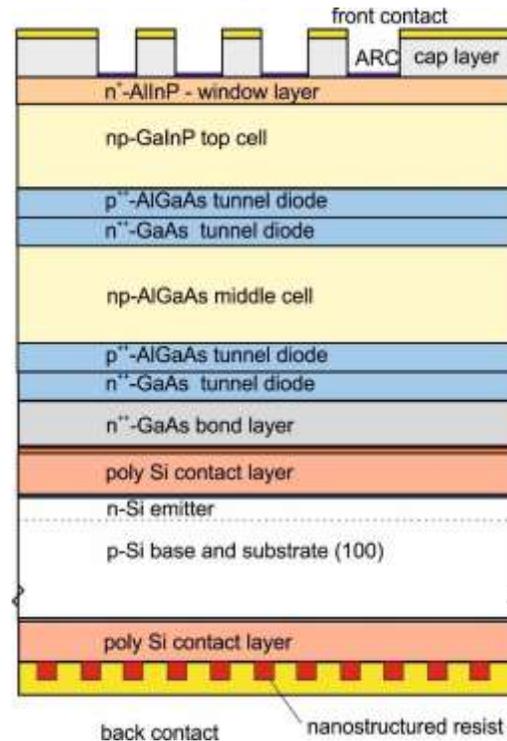
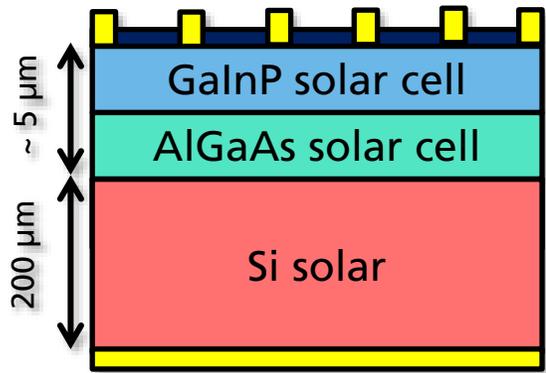
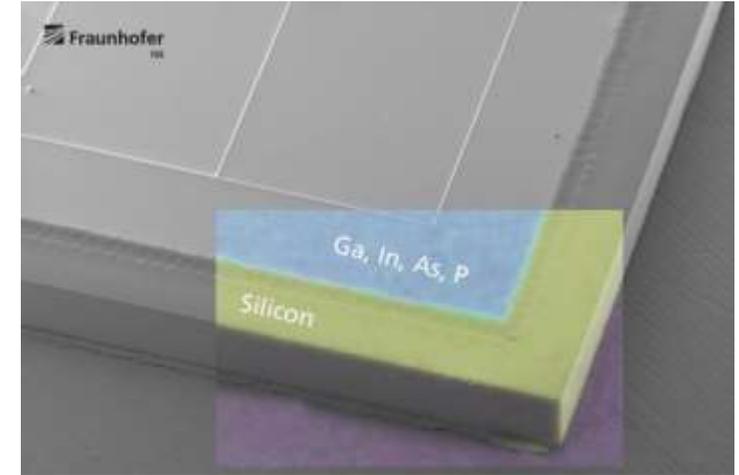


# Tandem PV

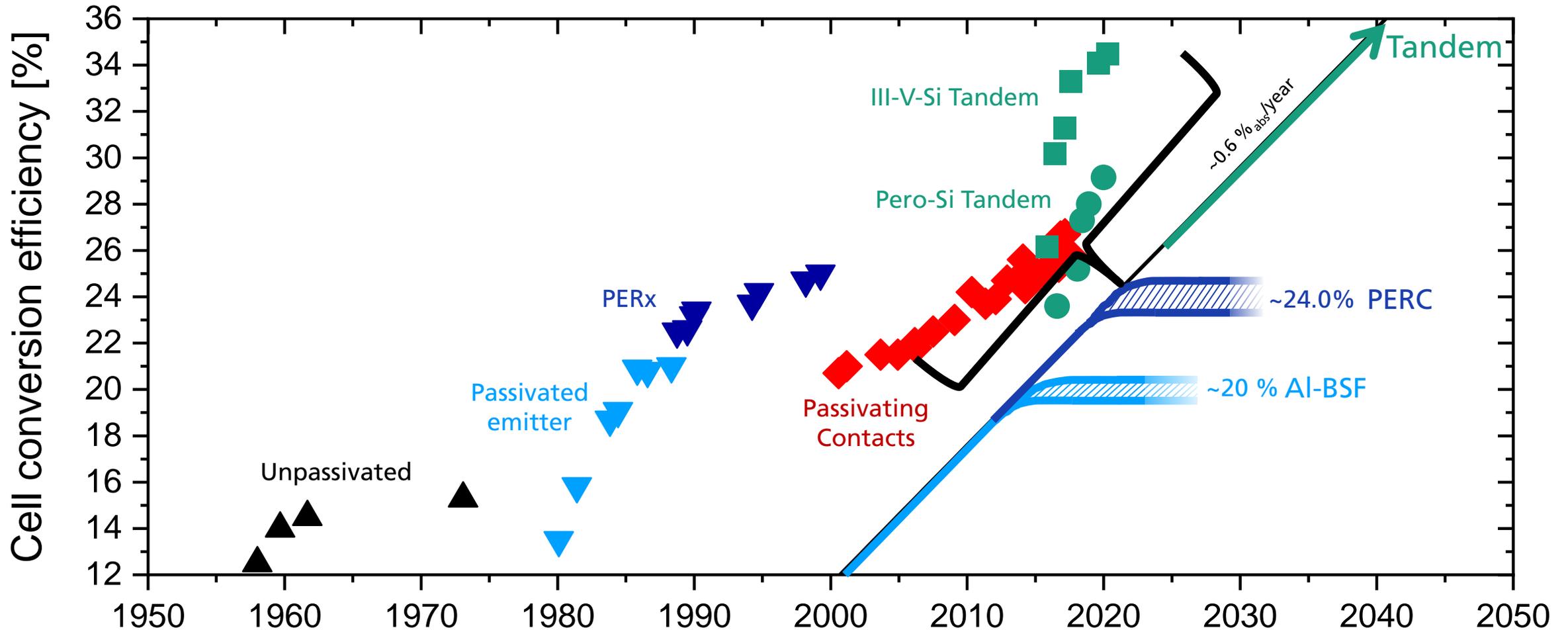
## III-V-Halbleiter auf Silicium

- drei Materialien: GaInP, AlGaAs, Si
- sehr hohe Spannungen > 3 V

**35,9% @ ISE**  
 Rekordwert für mono-  
 lithischen Tandemzellen  
 auf Silicium



# Transfer: Labor und Produktion



# PV-Produktion mit Blick auf Europa

## Aktueller Status entlang der Wertschöpfungskette

PV value chain

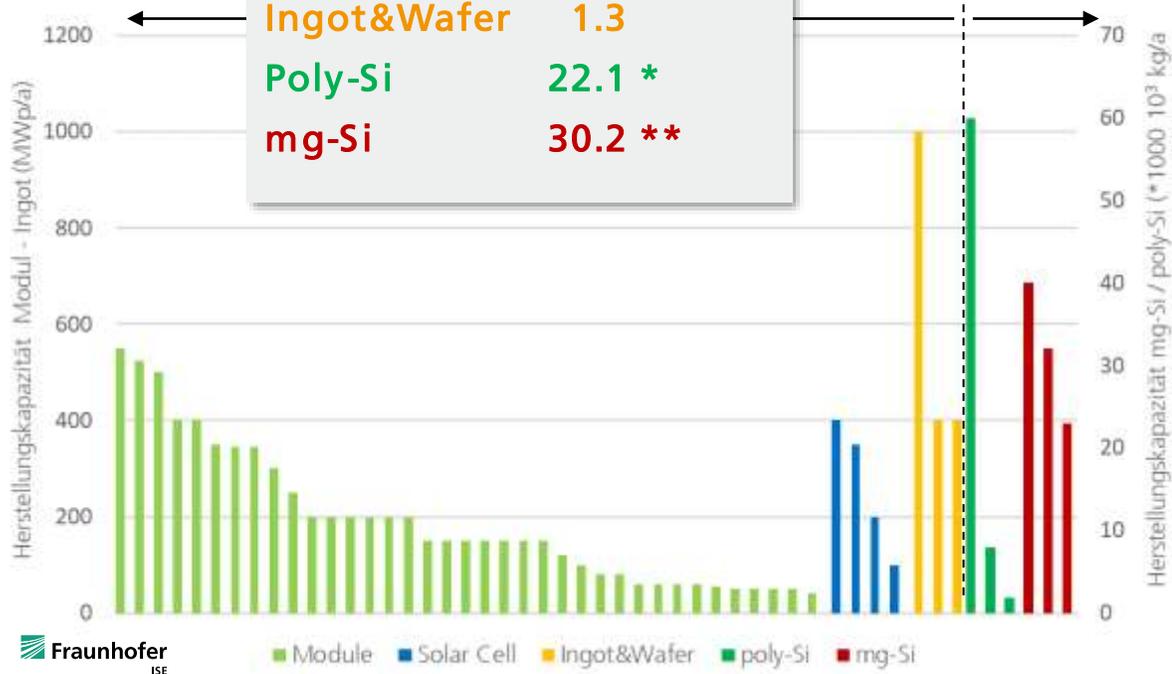
- mg-Si
- Poly-Si
- Ingot / Wafer
- Cell
- Module

Fab capacity

- > 1 GWp
- > 500 MWp
- > 100 MWp
- > 50 MWp

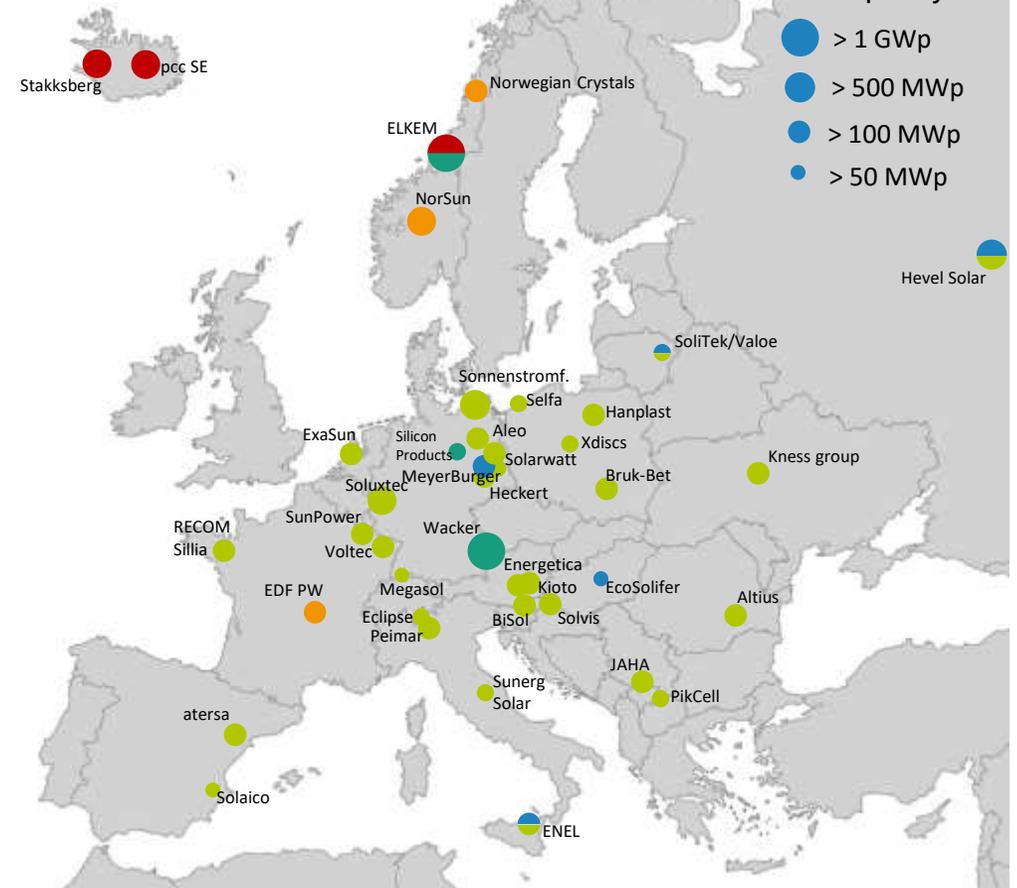
Produktionskapazitäten in Europa [GWp/a]:

Module	7.6
Solar cell	1.1
Ingot&Wafer	1.3
Poly-Si	22.1 *
mg-Si	30.2 **

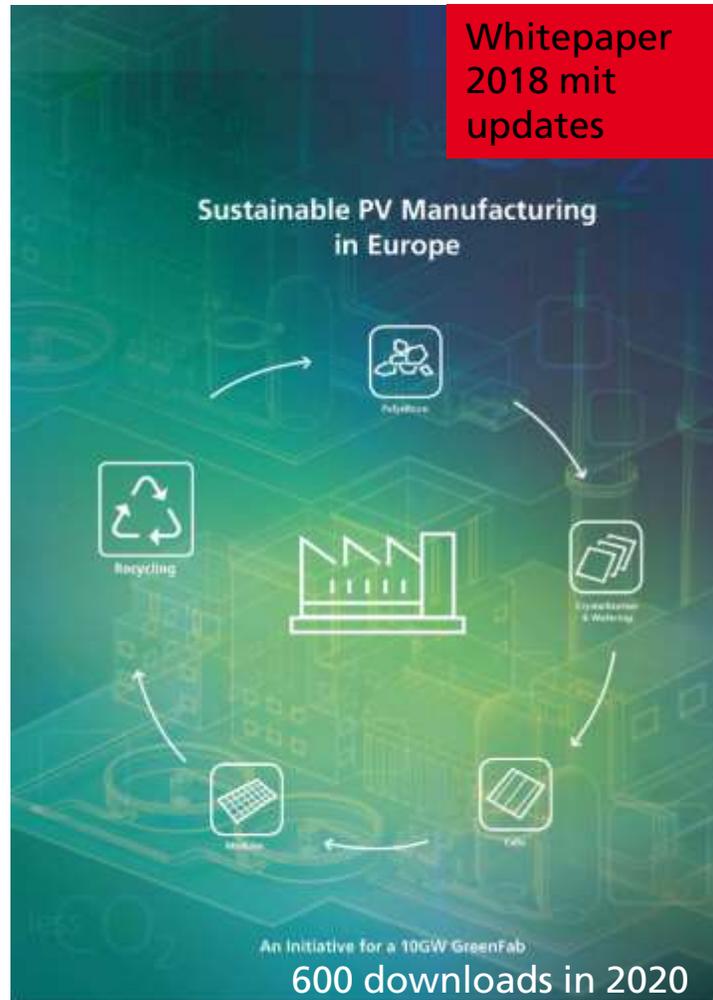


Source: Kartenmaterial: kartoxjm (fotolia) / europakarte.org

Fraunhofer ISE



# PV-Produktion in Europa



Whitepaper  
2018 mit  
updates

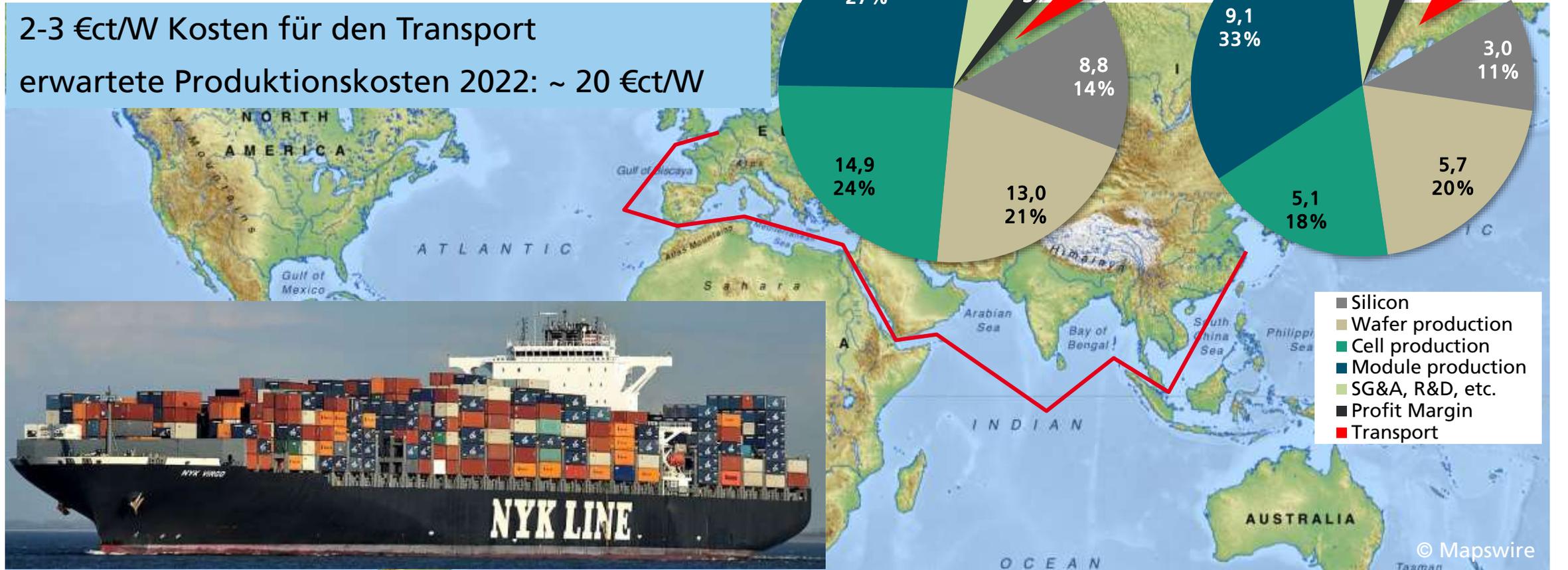
- 10 GW<sub>p</sub> vollintegrierte Produktion in Europa ist wettbewerbsfähig
- **Zentrale Argumente**
  - europäischer PV-Markt wird stark wachsen
  - Kostenanteil für Transport von Asien nach Europa >10 %
  - Produktion mit weniger CO<sub>2</sub> Emissionen
  - technologische Souveränität sichert Unabhängigkeit

# Transportkosten werden wichtig! 2022: > 10% Kostenanteil!

2-3 €ct/W Kosten für den Transport  
erwartete Produktionskosten 2022: ~ 20 €ct/W

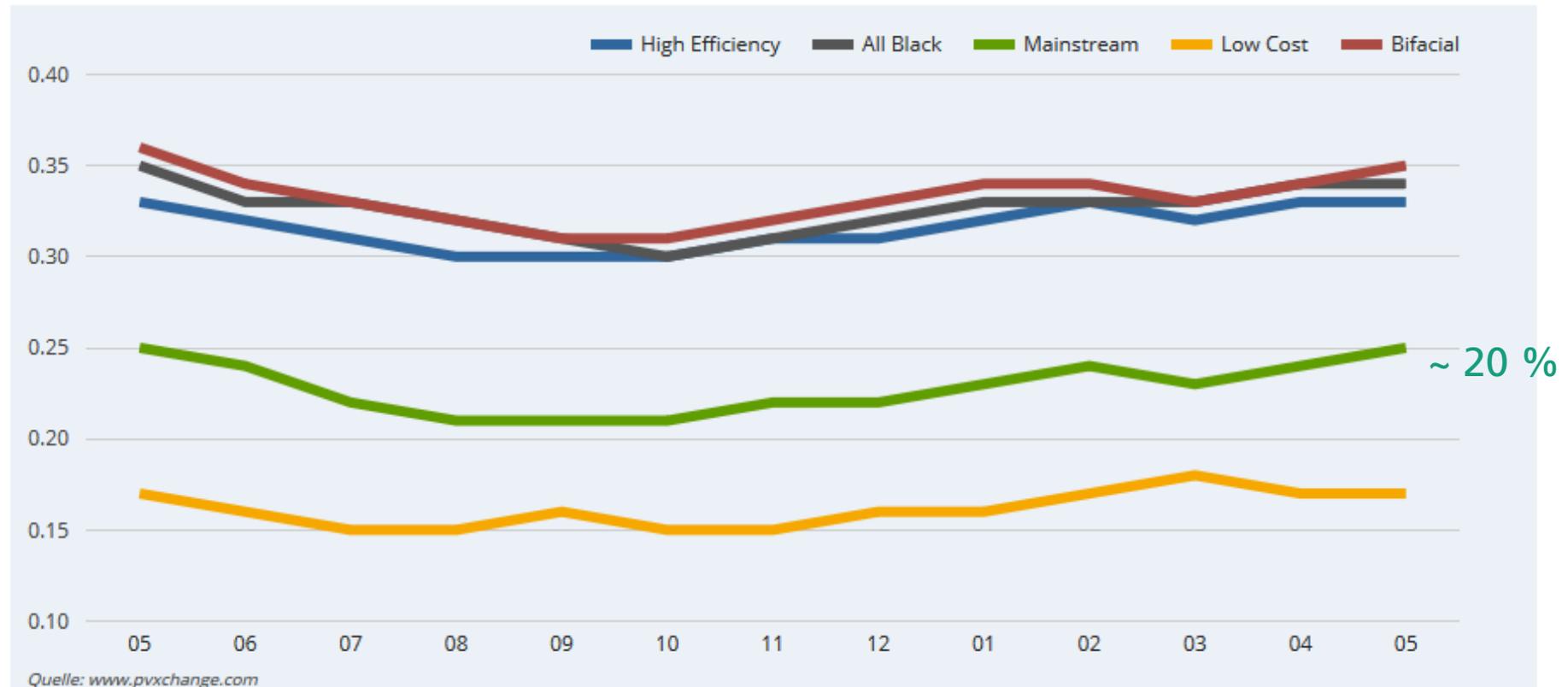
2014: 62,6 €ct/W<sub>p</sub>

2019 / 28,0 €ct/W<sub>p</sub>

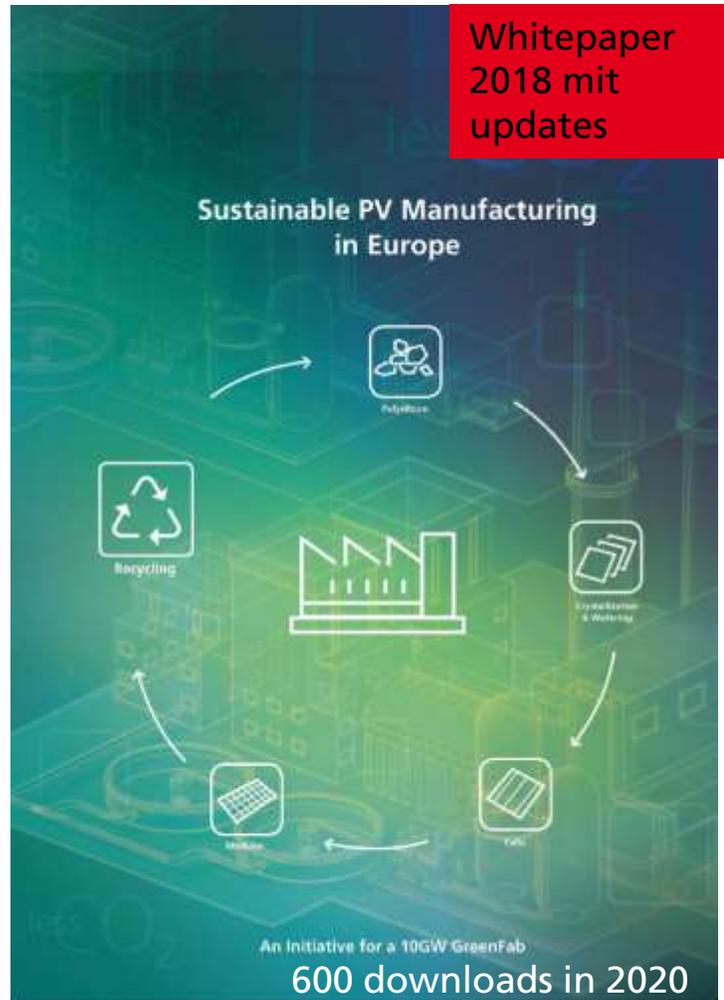


[https://de.wikipedia.org/wiki/Containerschiff#/media/Datei:NYK\\_Virgo\\_\(8154929586\).jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Containerschiff#/media/Datei:NYK_Virgo_(8154929586).jpg)

# Aktueller Trend: Steigende Modulpreise in Europa Zeigt Abhängigkeiten von Asien auf!



# PV-Produktion in Europa



- 10 GW<sub>p</sub> vollintegrierte Produktion in Europa ist wettbewerbsfähig
- **Zentrale Argumente**
  - europäischer PV-Markt wird stark wachsen
  - Kostenanteil für Transport von Asien nach Europa >10 %
  - Produktion mit weniger CO<sub>2</sub> Emissionen
  - technologische Souveränität sichert Unabhängigkeit

## Erfolge

- Meyer-Burger, Deutschland
- Greenland, Spanien
- PV-Giga, Polen
- Energetica, Österreich
- Vallis Solaris; Kroatien

**Photovoltaik  
als Basis für die Zukunft!  
Haben wir genug Flächen?**

# Photovoltaik und Flächen

## Freiflächen und Doppelnutzung von Flächen

Bedarf ~ 500 GW PV (~550 TWh\*)

Bei Freiflächen:

1 GW ~ 1000 Hektar = 10 km<sup>2</sup>  
→ ~ 5000 km<sup>2</sup> freie Fläche

Bei Agri-PV und Biotope:

1 GW ~ 1700 Hektar = 17 km<sup>2</sup>  
→ ~ 8500 km<sup>2</sup> Fläche

Deutschland: 357.581 km<sup>2</sup>

50,7 % Landwirtschaft

29,8 % Wald

14,4 % Siedlung und Verkehr



# Photovoltaik und Flächen

## Impuls zur Diskussion landwirtschaftliche Nutzung und PV-Nutzung

Silomais wird über Biomasse verstromt

- Silomais wird auf einer Fläche von ca. **1 Million Hektar** angebaut
  - Stromertrag von 18,7 Megawattstunden pro Hektar
- Ein Solar-Biotop würde ca. 600 Megawattstunden pro Hektar liefern (Faktor 32).
  - Eine Renaturierung von 1 Mio. Hektar durch die Einrichtung von Solar-Biotopen entspricht einem technischen Leistungspotenzial von ca. **600 GW**  
→ ausreichend für die PV-Versorgung in Deutschland

# Photovoltaik und Flächen

## Impuls zur Diskussion landwirtschaftliche Nutzung und PV-Nutzung

Silomais wird über Biomasse verstromt

- Silomais wird auf einer Fläche von ca. **1 Million Hektar** angebaut
  - Stromertrag von 18,7 Megawattstunden pro Hektar
- Ein Solar-Biotop würde ca. 600 Megawattstunden pro Hektar liefern (Faktor 32).
  - Eine Renaturierung von 1 Mio. Hektar durch die Einrichtung von Solar-Biotopen entspricht einem technischen Leistungspotenzial von ca. **600 GW**  
→ ausreichend für die PV-Versorgung in Deutschland

### NABU und BSW-Solar definieren Standards für naturverträgliche Solarparks

Solarparks können Flächen ökologisch aufwerten, sind der Naturschutzbund und der Bundesverband Solarwirtschaft überzeugt. Ein gemeinsames Papier legt jetzt Kriterien fest, anhand derer sich bemessen lässt, ob eine Photovoltaik-Freiflächenanlage dem Natur- und Artenschutz dient.

5. MAI 2021 RALPH DIERMANN

<https://www.pv-magazine.de/2021/05/05/nabu-und-bsw-solar-definieren-standards-fuer-naturvertraegliche-solarparks/>

# Synergiepotenziale der Integration/Doppelnutzung

- Flächeneffizienz, Akzeptanz
- Materialeffizienz (Hülle, Unterkonstruktion)
- Klimaresilienz
- lokale Wertschöpfung PV



# Doppelnutzung der Flächen

## Agriphotovoltaik APV



Italien, Villa Crespia Muratorio, Wine yard, 2011



Deutschland, Hegelbach, 2017

# Doppelnutzung von Flächen

## PV-Fahrbahn (RIPV) und Schwimmende PV (FPV)



Solarradweg 200 m<sup>2</sup> Fläche, 12 MWh/a Strom,  
Solmove Technologie (WDR 2018)



Schwimmende 750 kW PV-Anlage in Renchen  
auf dem Baggersee Maiwald  
(Erdgas Südwest, 2019)

# Bauwerkintegrierte PV (BIPV)



Bauwerkintegrierte PV, unsichtbar,  
blendfrei (ISE-Labor)



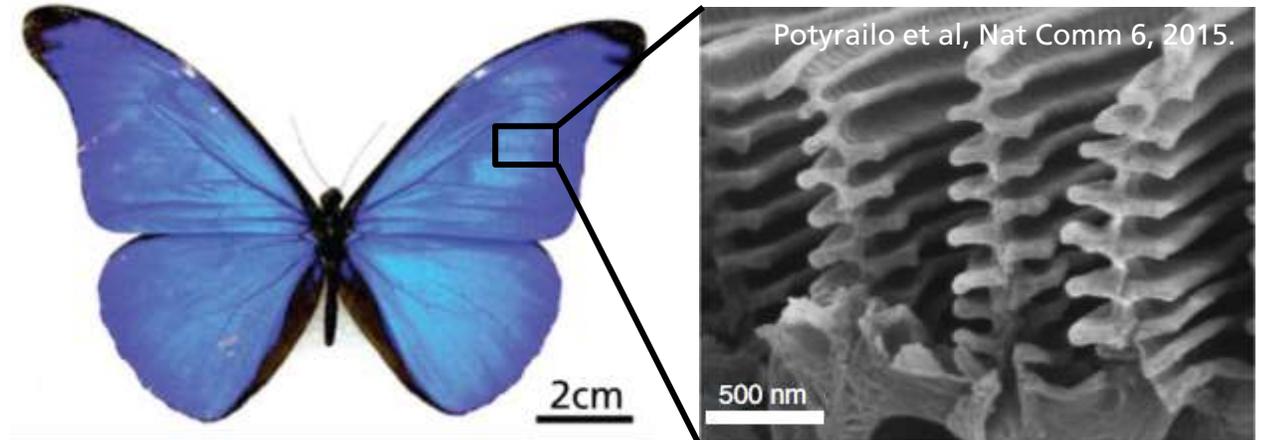
Bauwerkintegrierte PV (ISE-Labor)

# Bio-inspirierte photonische Strukturen für die Photovoltaik

## MorphoColor<sup>®</sup>

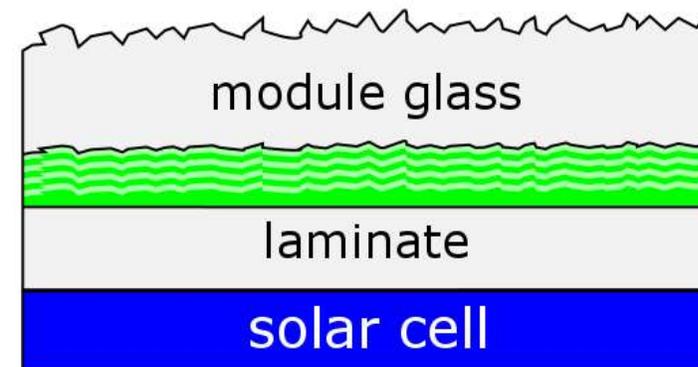
Idee:

- Morpho Schmetterling:  
brilliante Farbe, winkel-unabhängig  
aufgrund einer 3D photonischen Struktur



Technische Umsetzung:

- Morpho-Effekt wird durch einen Braggstapel und einem strukturierten Glassubstrat nachgebildet



# Bio-inspirierte photonische Strukturen für die Photovoltaik

## MorphoColor<sup>©</sup>

- Schmalband-Reflexion:
    - eindruckliche Farbdarstellung
    - nur 7% **relativer** Wirkungsverlust
  - unterschiedliche Farben darstellbar
  - lediglich das Deckglas der Module muss geändert werden
- ➔ Standard-Solarzellen und Laminierprozess können verwendet werden



Demonstrator Module: 1.09 x 1.12 m<sup>2</sup>

# Bio-inspirierte photonische Strukturen für die Photovoltaik

## MorphoColor® PV Module für die Integration in Autos



Frankfurt Motor Show (IAA), 2019

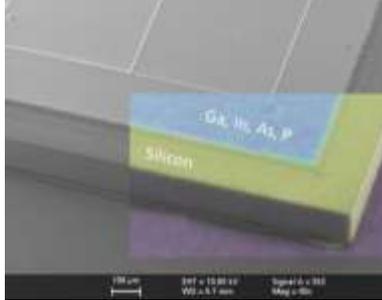
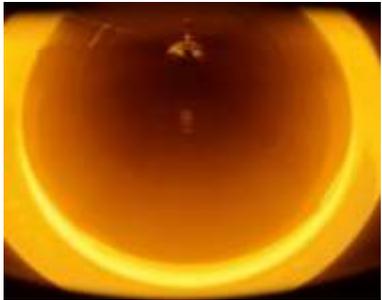


\* Matrix shingled silicon cells

# Zusammenfassung

- Photovoltaik ist heute kostengünstig und DER Treiber bzw. die Basis für die Energiewende.
- In Deutschland werden bis 2050 mehr als 500 GW Photovoltaik Installation benötigt.
  - Der aufgrund der Sektorenkopplung erwartete Strombedarf wird > 1000 TWh in 2050 sein.
- Die Photovoltaik triggert technologische Entwicklungen in anderen Sektoren:
  - elektrische Speicher
  - Grüner Wasserstoff
- Die Integration von Solarzellen in alle denkbaren Flächen bietet ausreichend Potenzial!

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!  
Ich freue mich auf Fragen.**

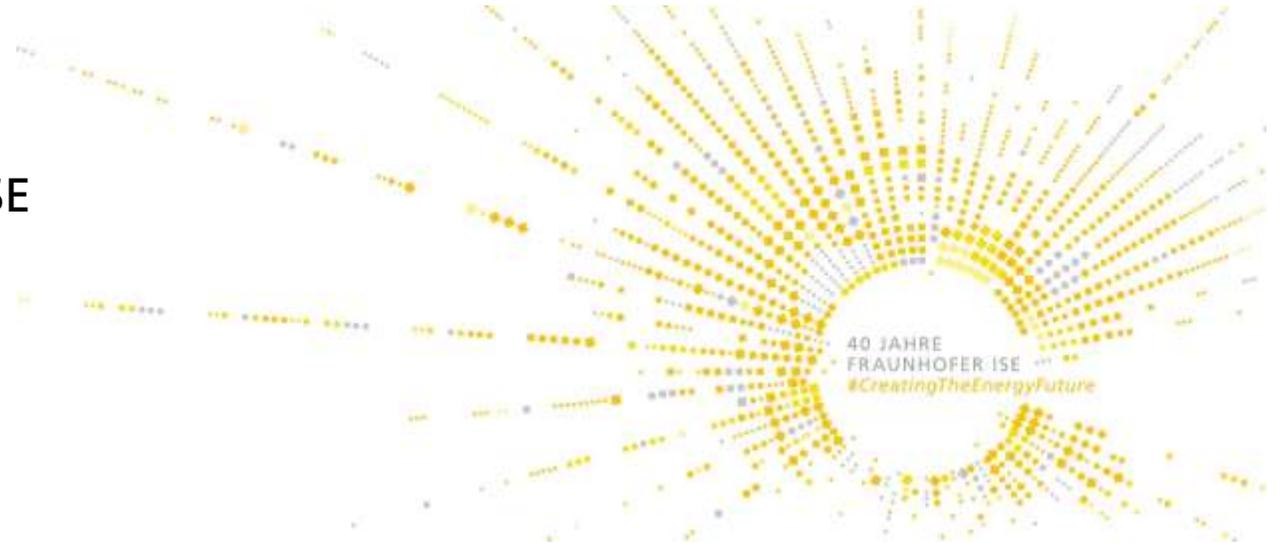


Fraunhofer Institute für Solare Energiesysteme ISE

Prof. Dr. Andreas Bett

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

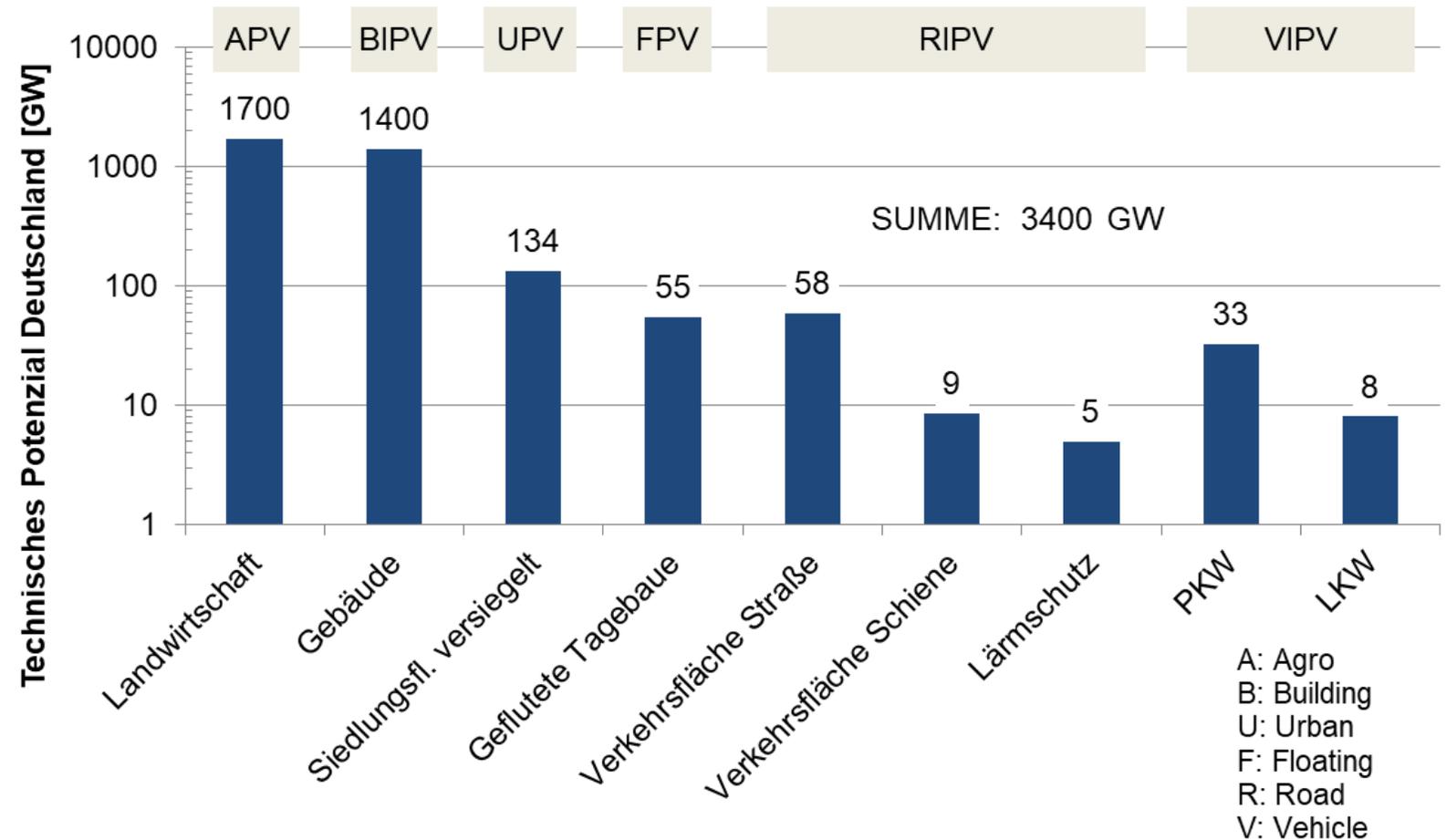
[andreas.bett@ise.fraunhofer.de](mailto:andreas.bett@ise.fraunhofer.de)



# Photovoltaik Potenziale auf Flächenbasis in Deutschland

## Doppelnutzung

- theoretisches Potenzial: physikalische Gesetzmäßigkeiten
- **technisches Potenzial:** technische Restriktionen
- wirtschaftlich-praktisches Potenzial: Kosten, Infrastruktur, Rechtsrahmen, Akzeptanz



# Studie: Stromgestehungskosten

