

# Ein De-fossiliertes und nachhaltiges Energiesystem - Unsere Zukunft!

---

**100. Mahnwache in Endingen zum Thema Fukushima-Fessenheim**

**Prof. Andreas Bett  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg**

**24. Juni 2024  
[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)**

# Agenda

- 1** Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
- 2 Rolle der Photovoltaik im Erneuerbaren Energiesystem
- 3 Atomausstieg in Deutschland
- 4 Negative Emissionen
- 5 Zusammenfassung





# Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

## Unsere Geschäftsfelder

Photovoltaik –  
Materialien, Zellen,  
Module

Solkraftwerke und  
Integrierte Photovoltaik

Elektrische  
Energiespeicher

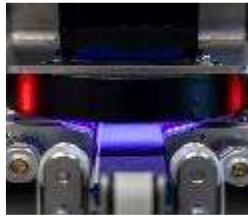
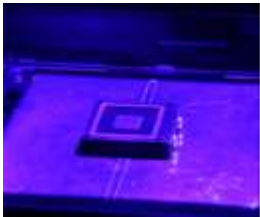
Leistungselektronik und  
Stromnetze

Photovoltaik –  
Produktionstechnologie  
und Transfer

Klimaneutrale Wärme  
und Gebäude

Wasserstofftechnologien

Systemintegration



# Agenda

- 1 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
- 2 **Rolle der Photovoltaik im Erneuerbaren Energiesystem**
- 3 Atomausstieg in Deutschland
- 4 Negative Emissionen
- 5 Zusammenfassung

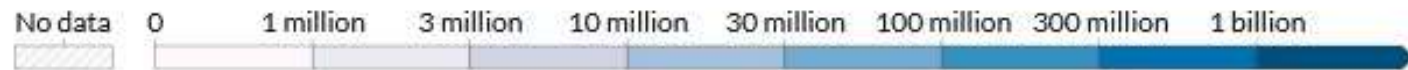
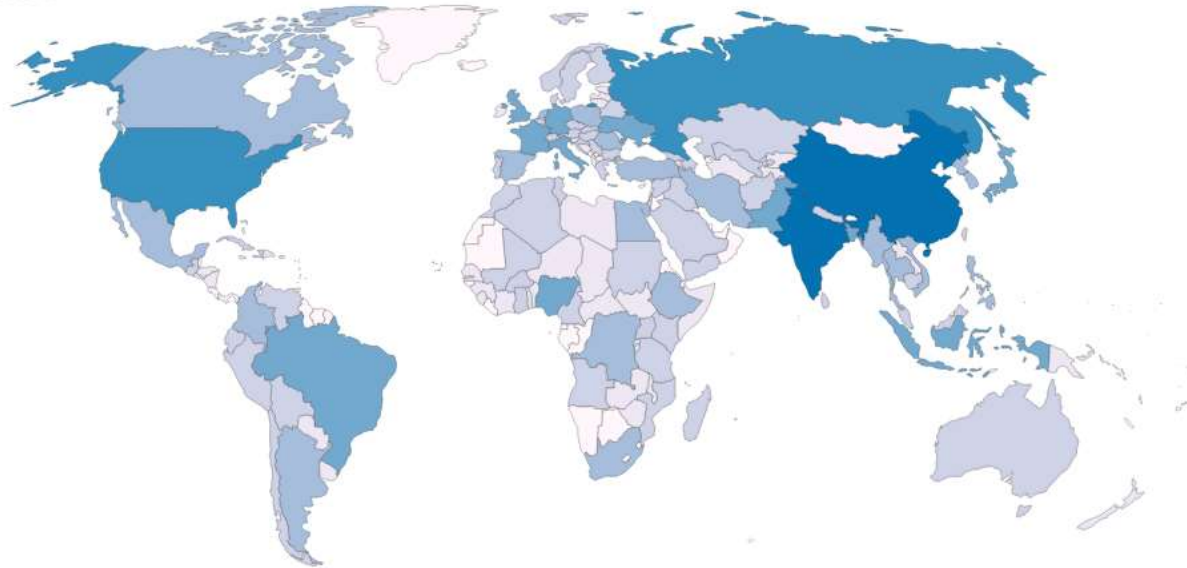


# Bevölkerungswachstum und Klimawandel

## Einleitung

**Anstieg der Weltbevölkerung  
und zunehmende Verstädterung**

1950

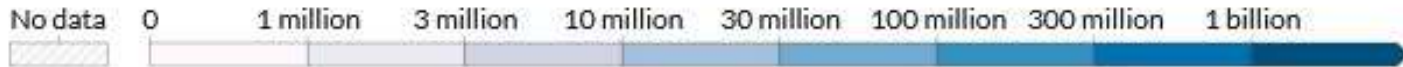
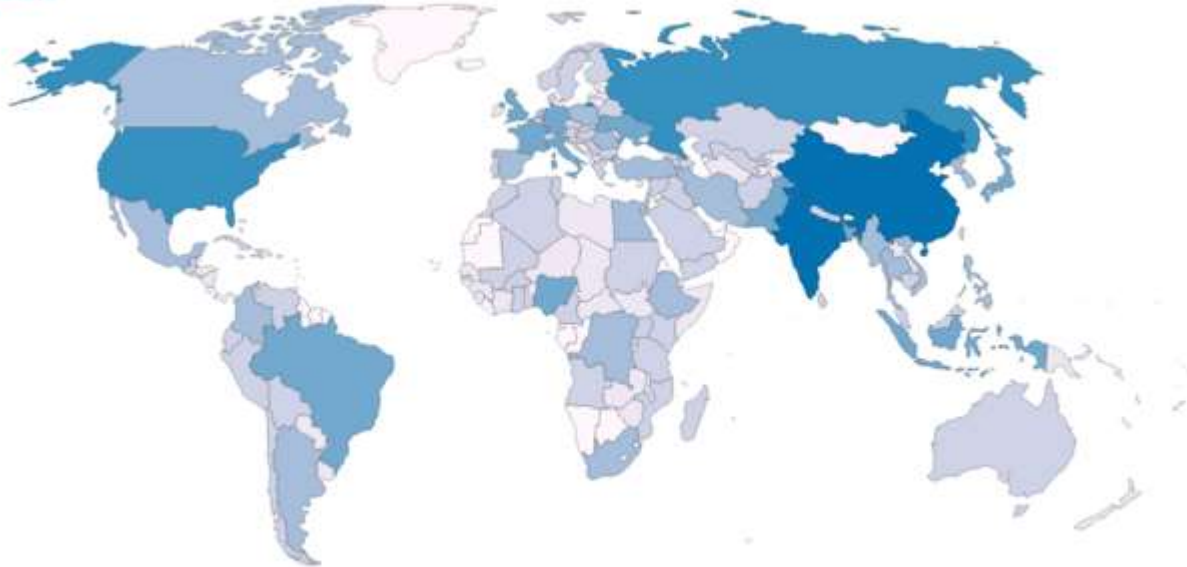


# Bevölkerungswachstum und Klimawandel

## Einleitung

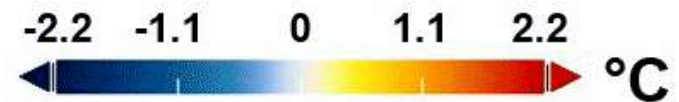
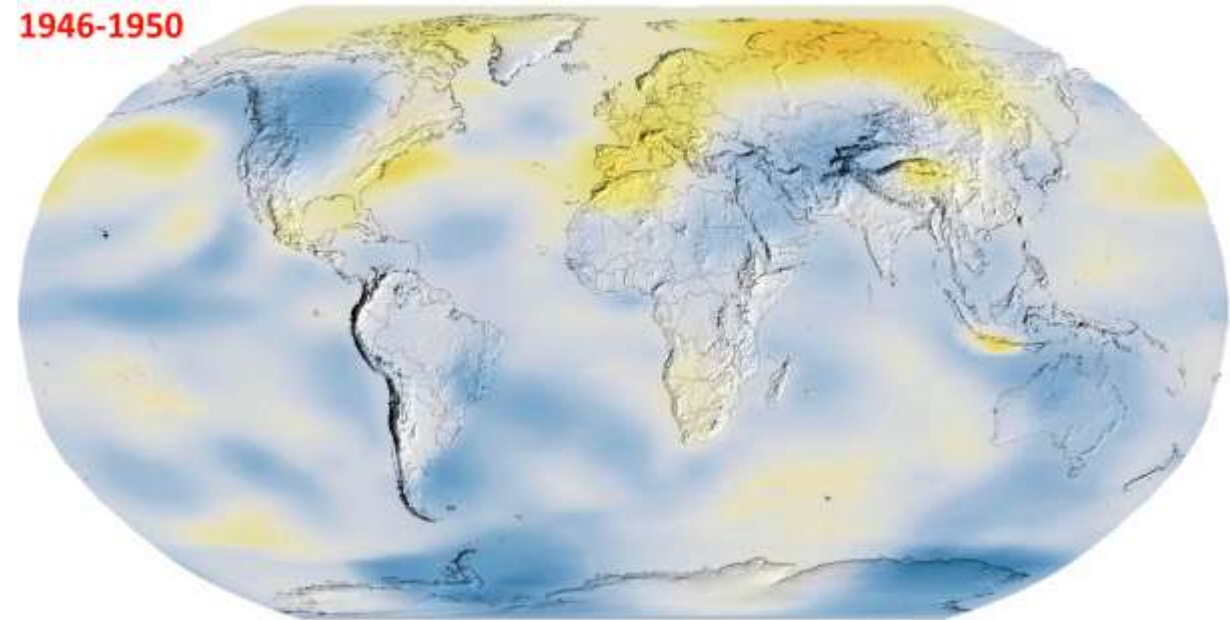
Anstieg der Weltbevölkerung  
und zunehmende Verstädterung

1950

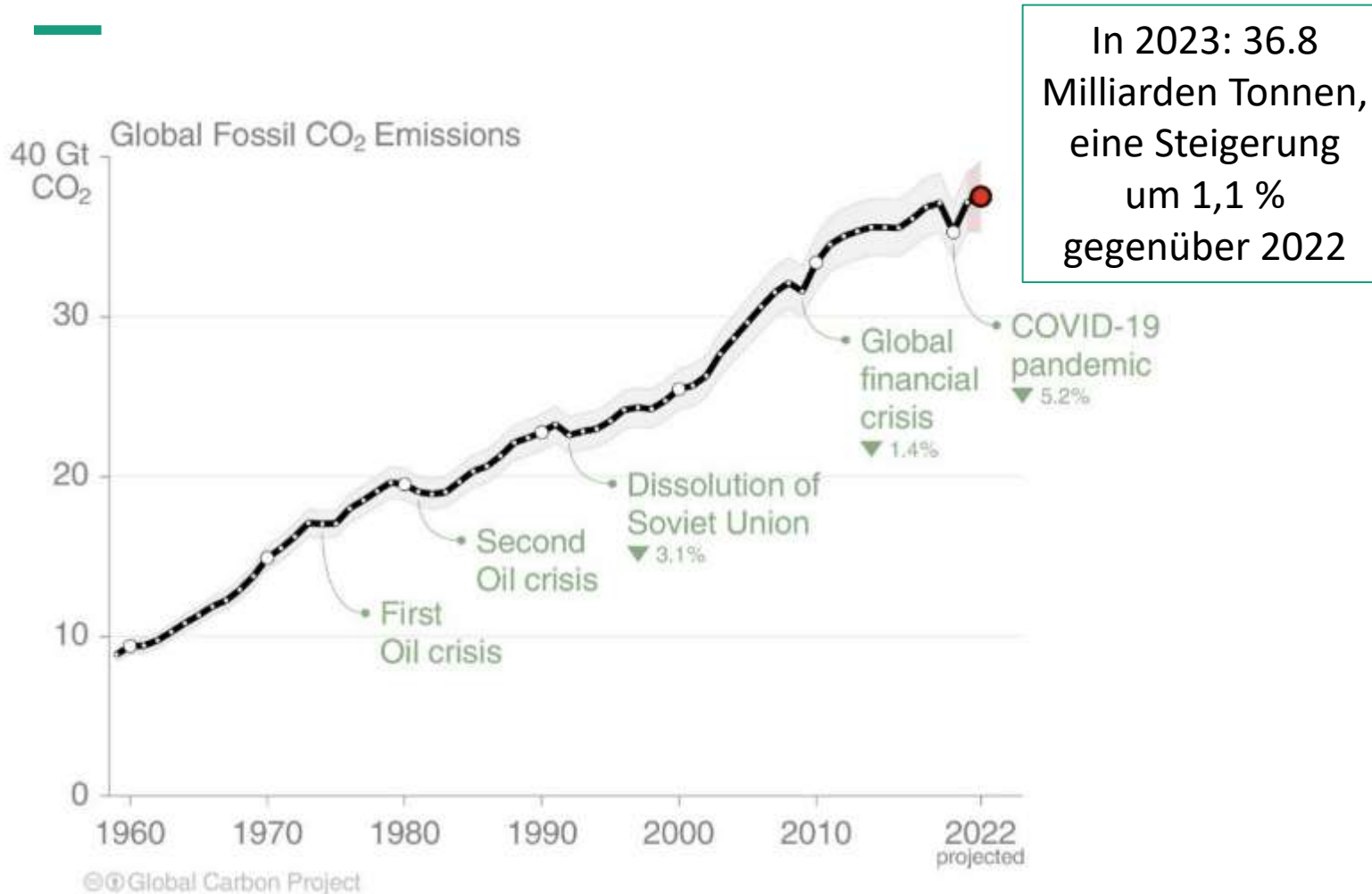


Erwärmung des Klimas, extreme  
Wetterereignisse

1946-1950



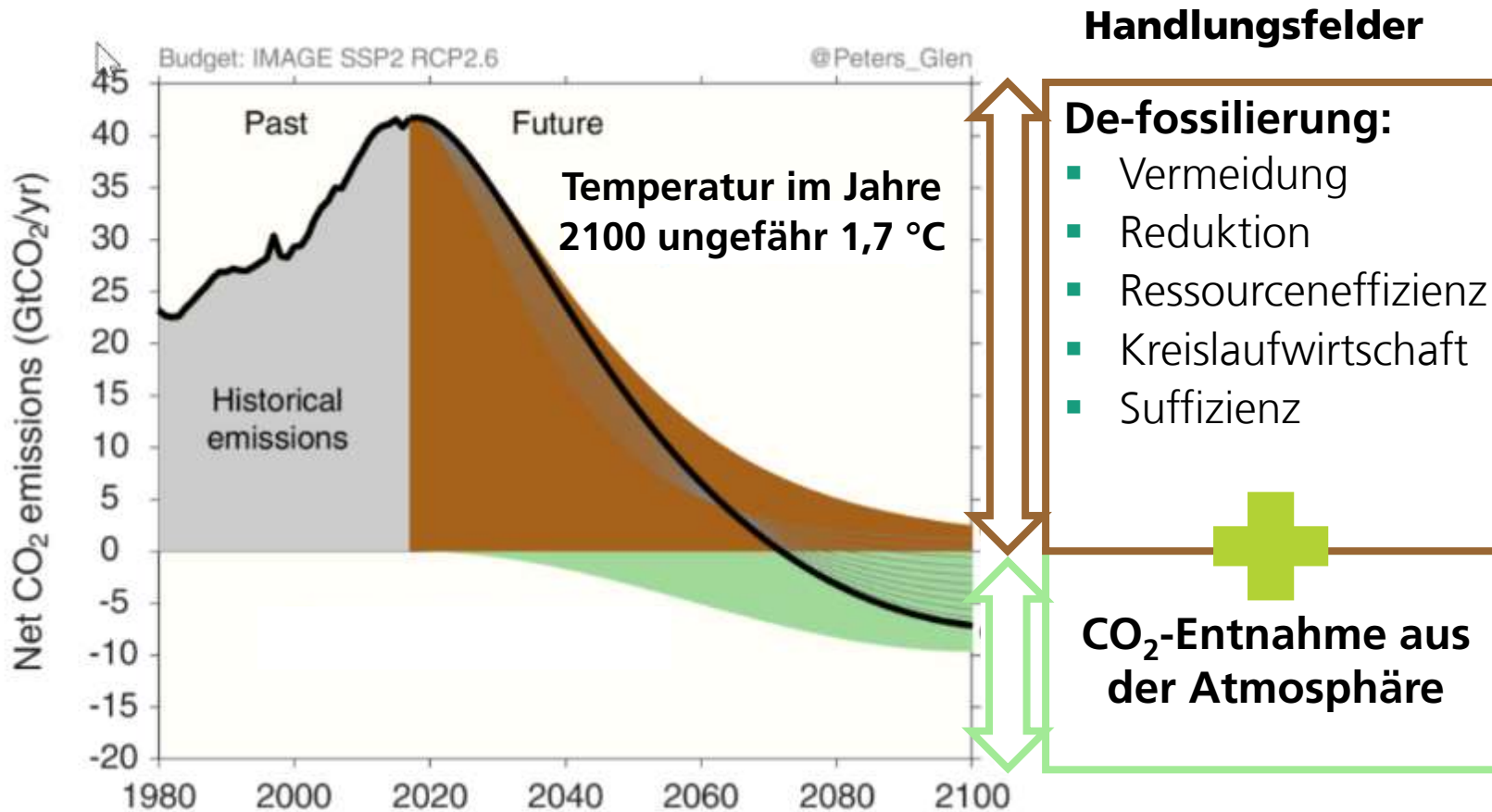
# Globale Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) Emissionen seit 1960



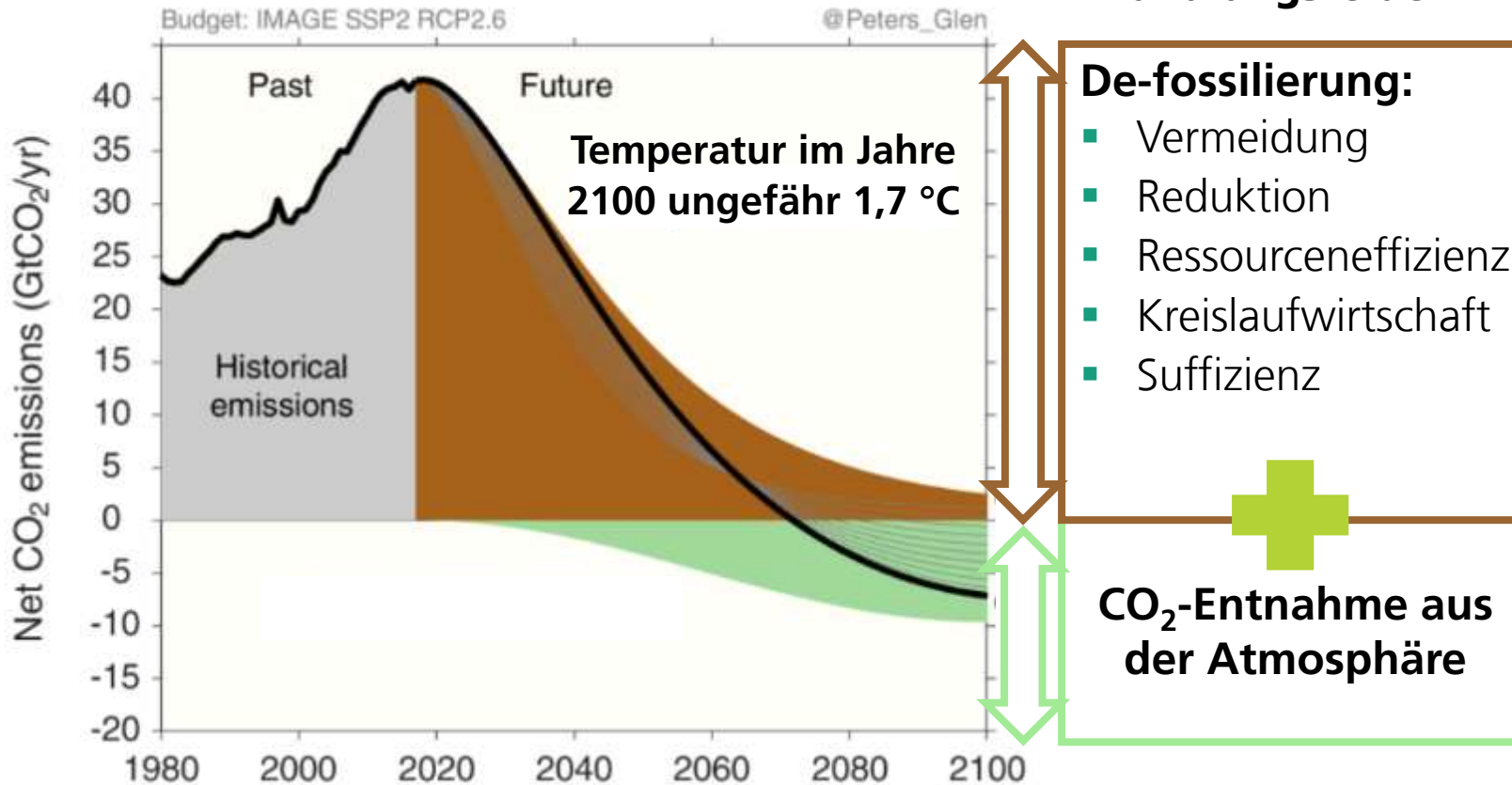
[https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/22/files/CarbonBudget2022\\_CICERO\\_press\\_English.pdf](https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/22/files/CarbonBudget2022_CICERO_press_English.pdf)



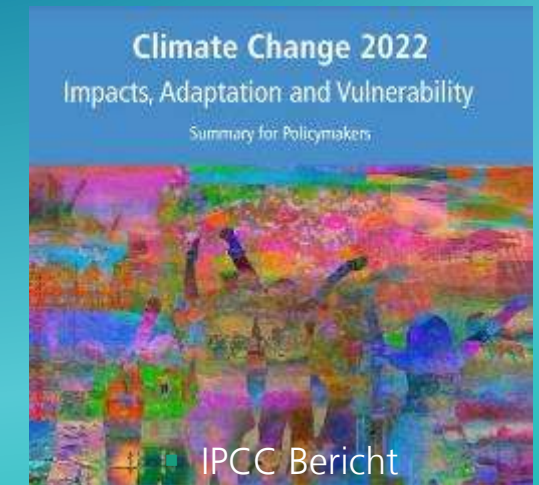
# De-fossilierung und CO<sub>2</sub>-Entnahme



# De-fossilierung und CO<sub>2</sub>-Entnahme

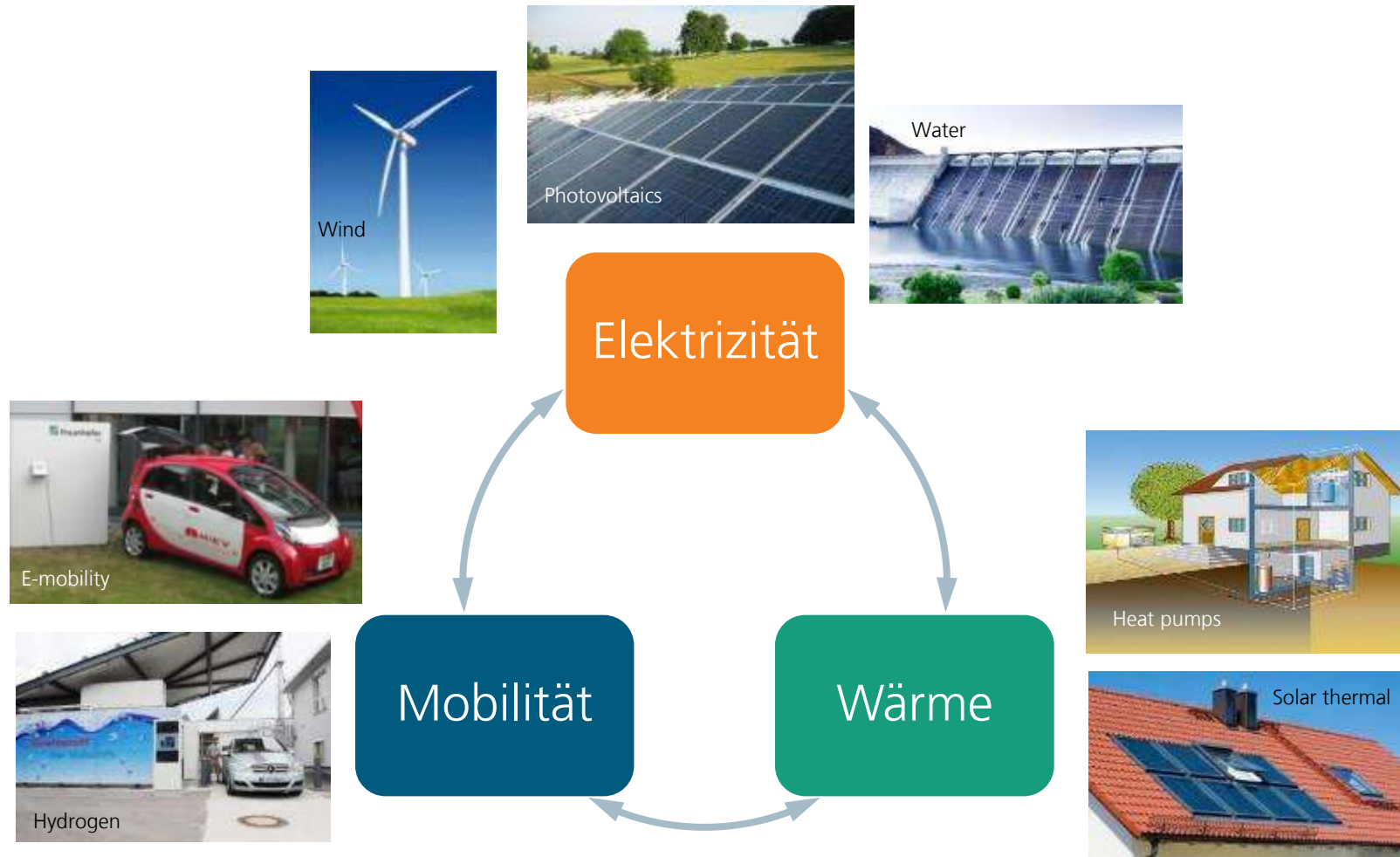


Die Aussage des IPCCs (Intergovernmental Panel on Climate Change) ist unmissverständlich: Es gibt keine realistischen Szenarien zur Klimazielerreichung „Well below 2 °C“ ohne CO<sub>2</sub>-Senken



# Zukünftiges de-fossiliertes und nachhaltiges Energiesystem

Elektrifizierung und Kopplung verschiedener Sektoren



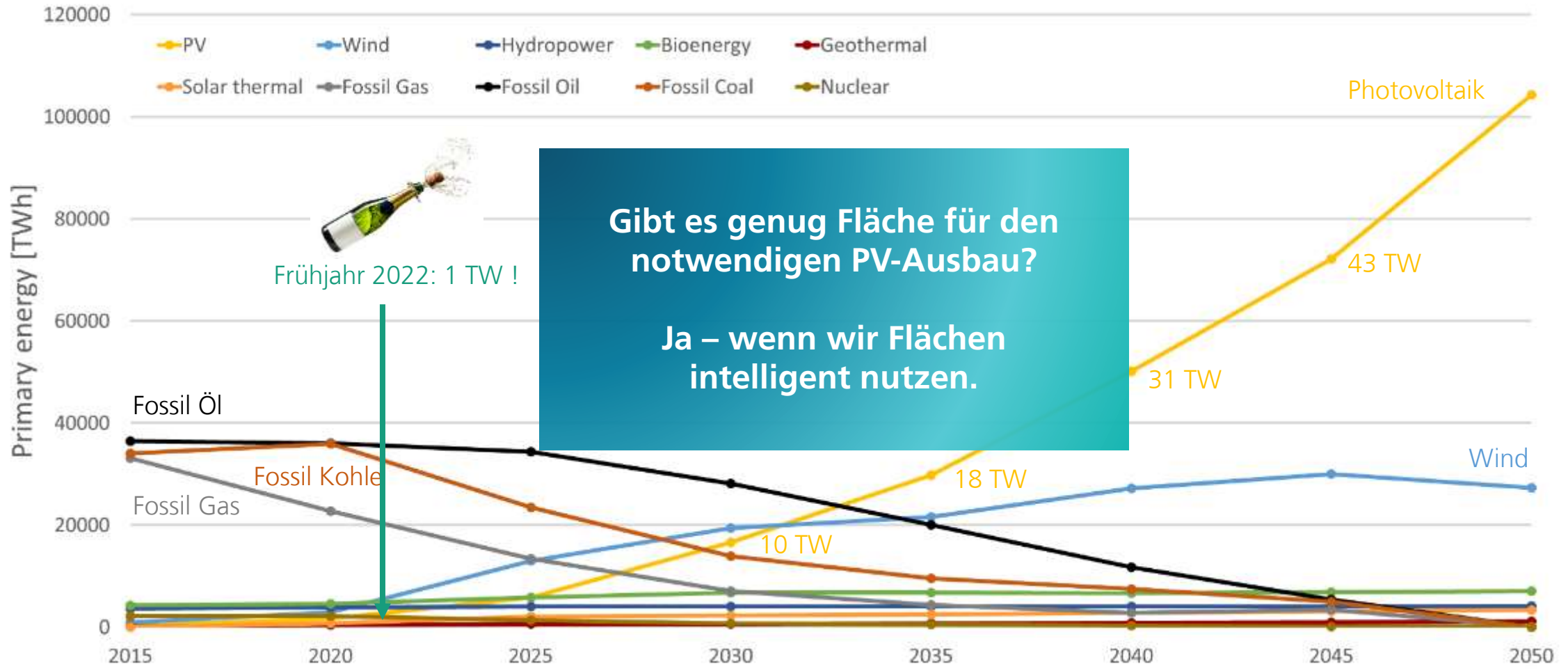
**Wir müssen alle Bereiche  
unseres Energiesystems de-  
fossilisieren!**

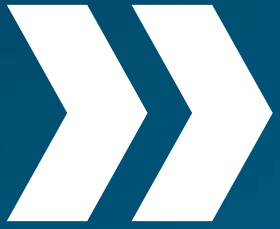
**Das ist eine  
Herausforderung, bietet  
aber viele Chancen.**

**→ Letztendlich:  
Es wird mehr elektrische  
Energie, aber weniger  
Primärenergie benötigt!**

# Transformation der globalen Energieversorgung auf CO<sub>2</sub>-Neutralität 2050

Der Blick in die Zukunft

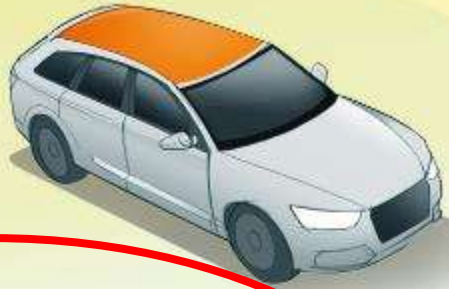




## – Trilemma der Landnutzung –

Land ist notwendig für **Klimaschutz**, **Ernährungssicherheit** und Erhalt der **Biodiversität**. Nur durch die Kombinationen von Schutz und multiplen Nutzungen der Landschaft können Mehrgewinne erzielt werden, so dass **Konkurrenzen überwunden werden.** *WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2020)*

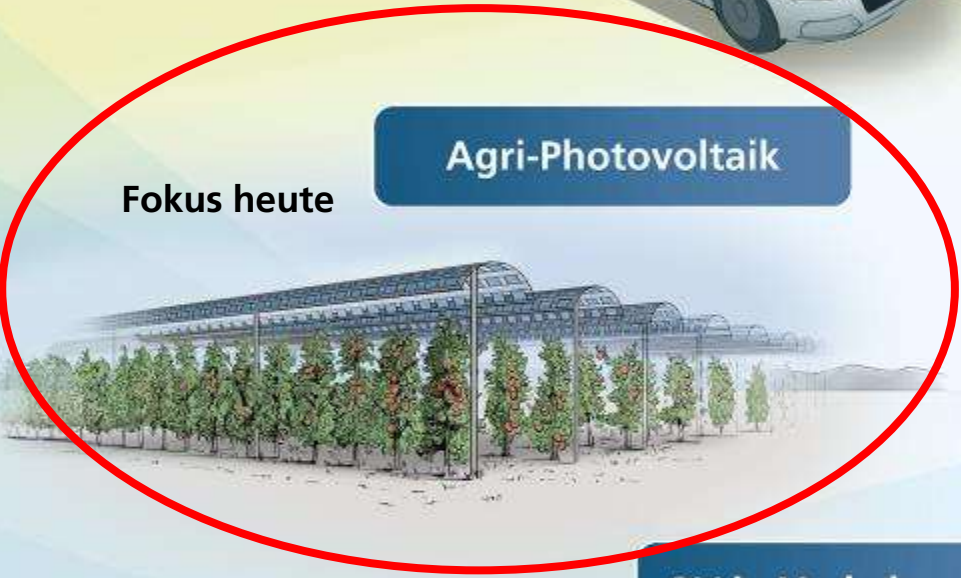
Fahrzeugintegrierte PV



Bauwerkintegrierte PV



Agri-Photovoltaik



Fokus heute

# INTEGRIERTE PHOTOVOLTAIK

Urbane Photovoltaik



PV in Verkehrswegen



Schwimmende PV



# 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

Neuer Vorschlag der Fraunhofer-Gesellschaft

## Kartoffeln unter dem Kollektor



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**



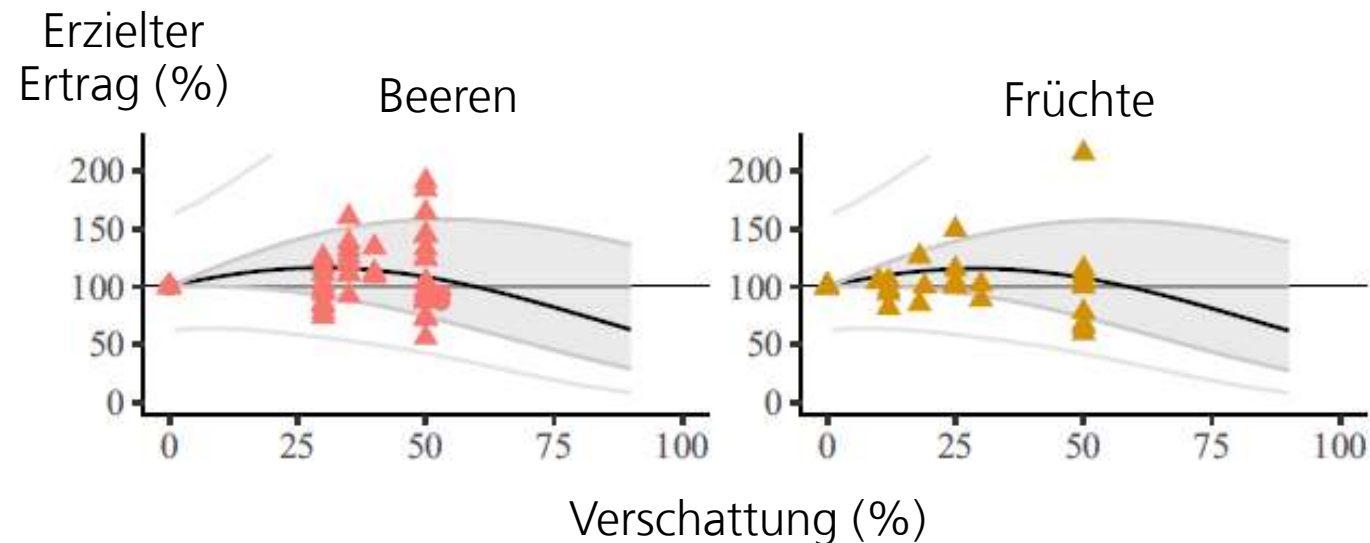
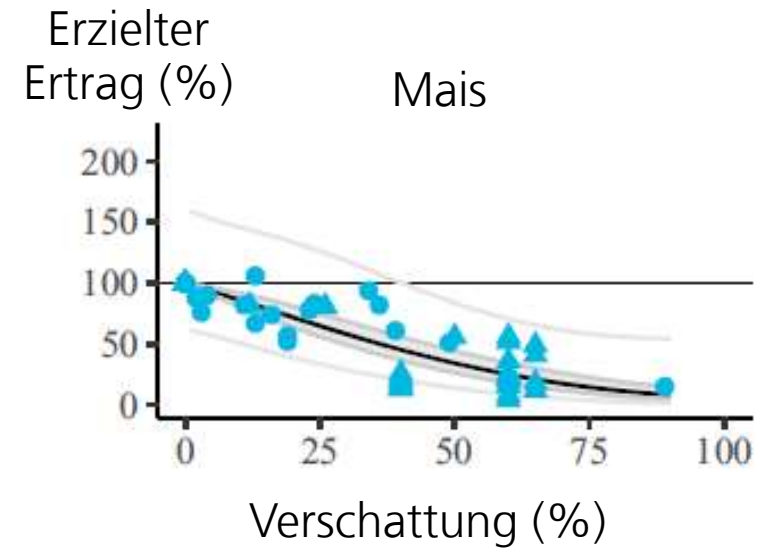
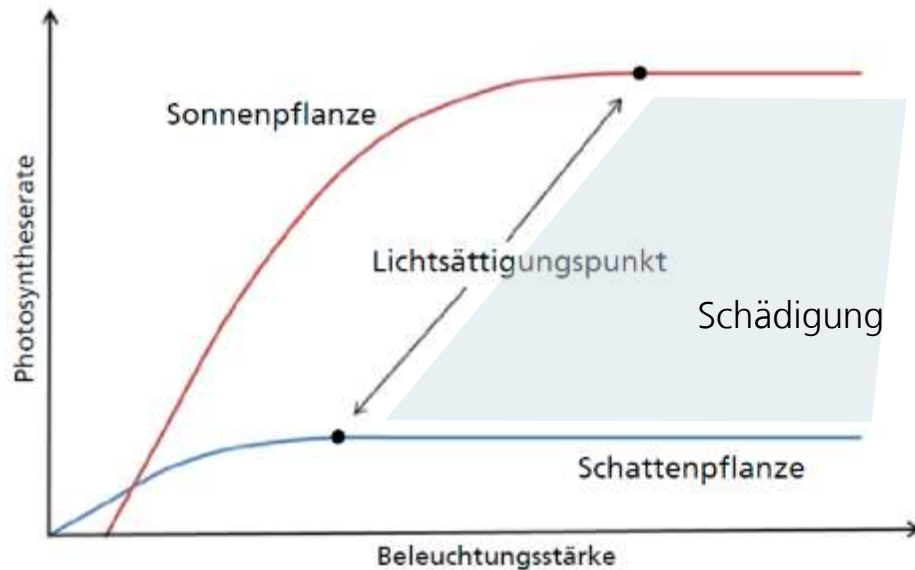


# Wie viel Licht brauchen Pflanzen?

## Verschattungstoleranz

**Metastudie** zu 58 Verschattungsexperimenten

- 38 verschiedene Kulturen und ca. 400 Datenpunkte
- Obst- und Beerenbau: Ertragssteigerungen bei geringer Verschattung, Vollertrag bei 50 % Verschattung
- Ackerbau und Grünland: auch geringe Verschattung negativ, hohe Ertragsverluste bei 50 % Verschattung



# Agri-PV – Chancen für die Landwirtschaft und die Energiewende

## Take Aways

---

### Benefits für die Landwirtschaft

- puffert Temperaturspitzen
- Verringerung von Trockenstresssituationen
- Schutz vor Dauerregen und Hagel
- Ergänzung zum herkömmlichen Hagelschutz
- Pflanzenschutzmittelreduktion
- Einkommensdiversifizierung

### Benefits für die Energiewende

- großes Flächenpotenzial

### Herausforderungen

- Finanzierung

- **Strategische Minimierung klimabedingter Ertrags-Verluste/ Schwankungen in der Landwirtschaft durch Agri-PV**
- **Entschärfung des Flächennutzungskonflikts**

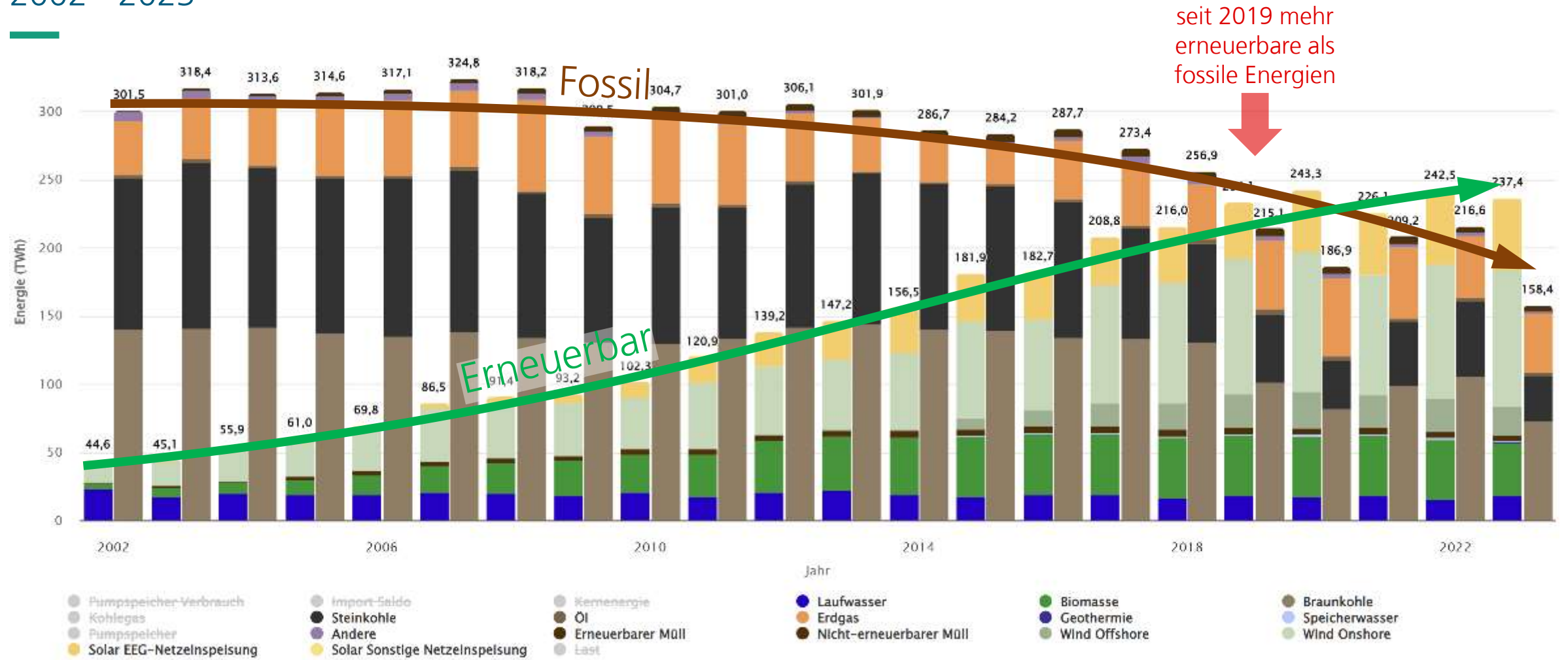
# Agenda

- 1 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
- 2 Rolle der Photovoltaik im Erneuerbaren Energiesystem
- 3 **Atomausstieg in Deutschland**
- 4 Negative Emissionen
- 5 Zusammenfassung



# Vergleich: Erneuerbare und fossile Stromerzeugung

2002 - 2023

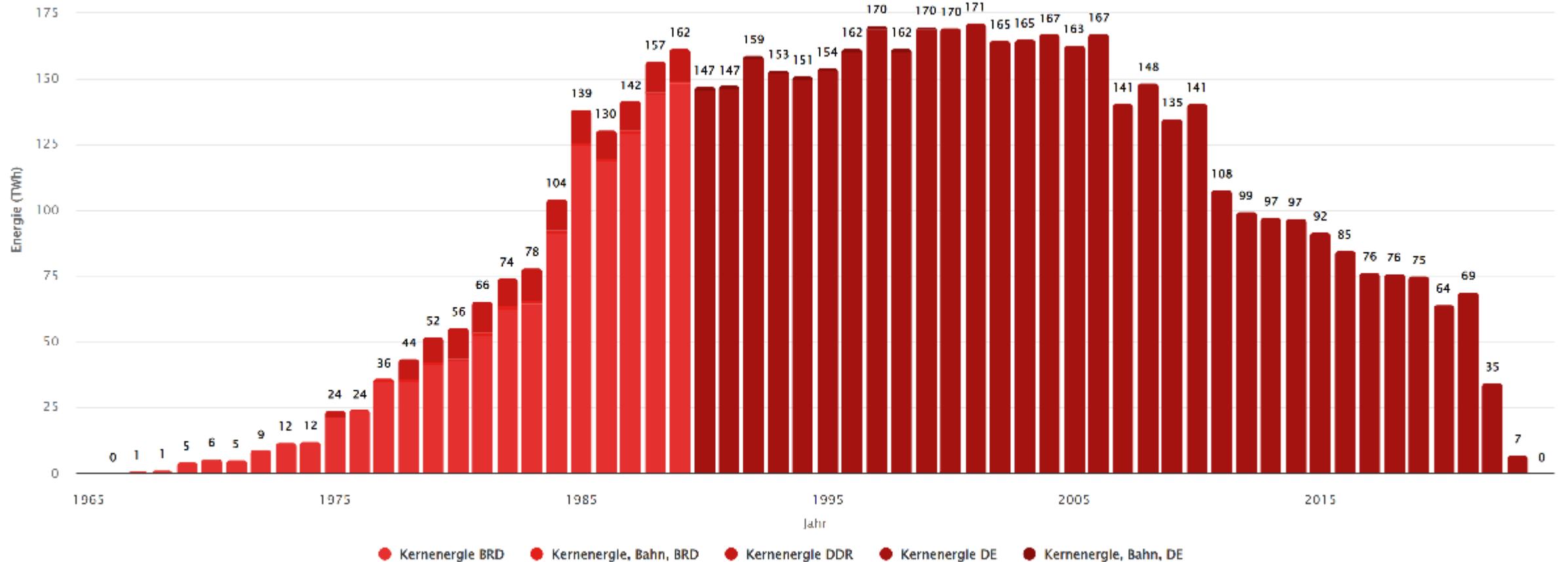


seit 2019 mehr erneuerbare als fossile Energien

Energy-Charts.info - letztes Update: 07.12.2023, 14:42 MEZ

# Die Geschichte der Kernenergie in Deutschland

## Bruttostromerzeugung

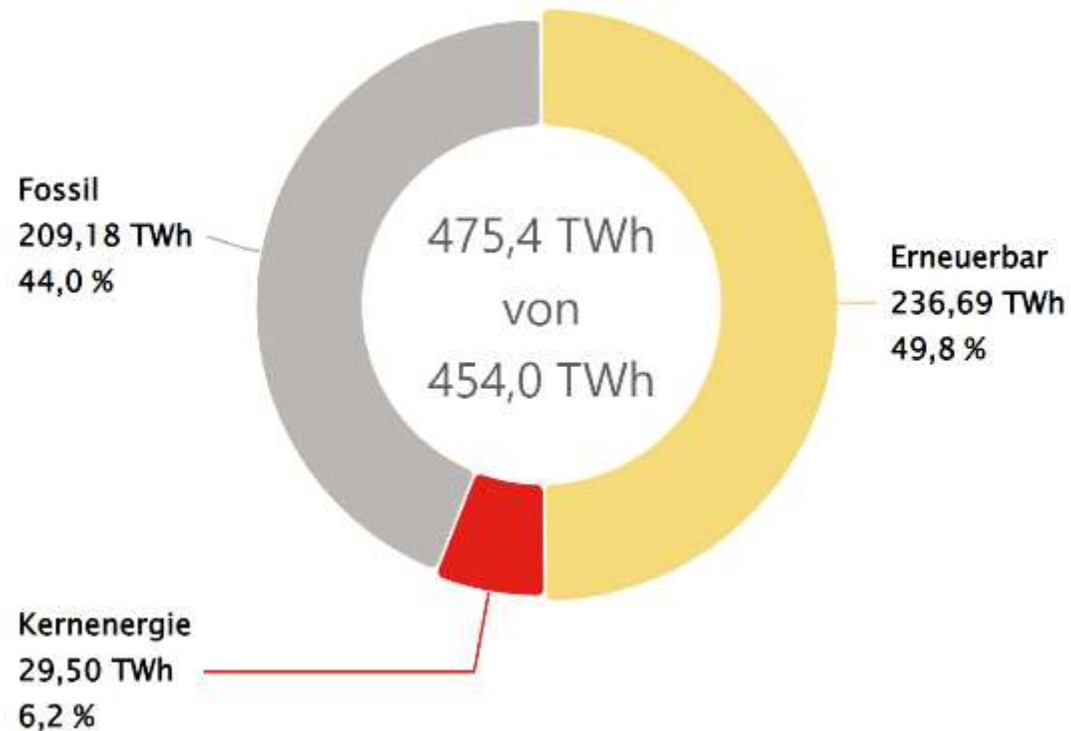


Energy-Charts.info - letztes Update: 02.04.2024, 15:30 MEZ

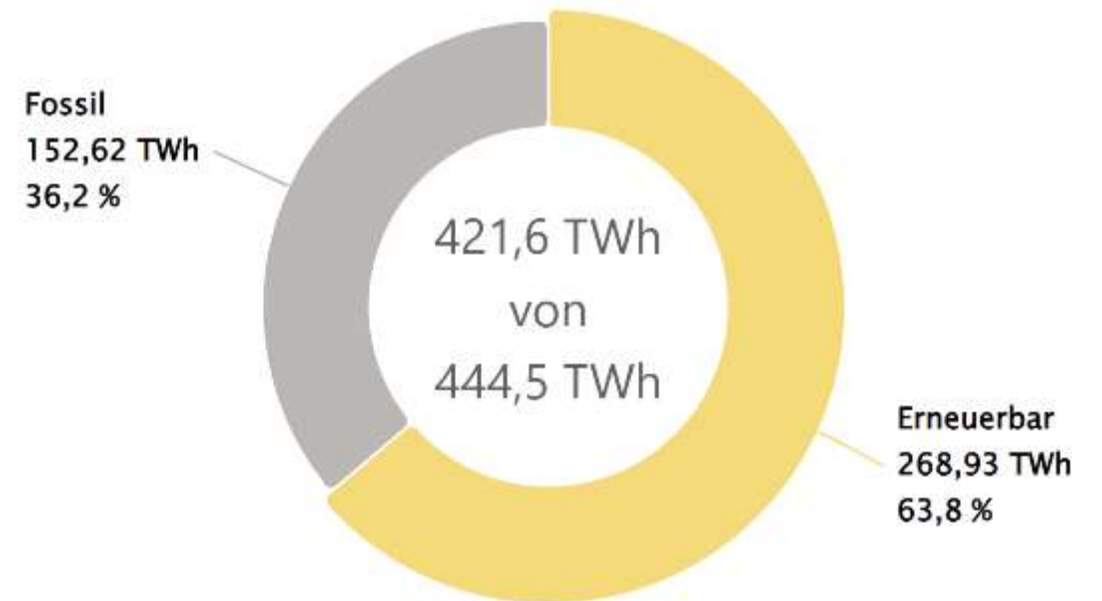
# Öffentliche Nettostromerzeugung

Jahresscheiben jeweils vom 16.04. bis zum 15.04.

16.04.2022 – 15.04.2023: mit 3 AKW



16.04.2023 – 15.04.2024: ohne AKW



# Strompreise für Neukunden

Jahresverbrauch von 4.000 kWh



# Agenda

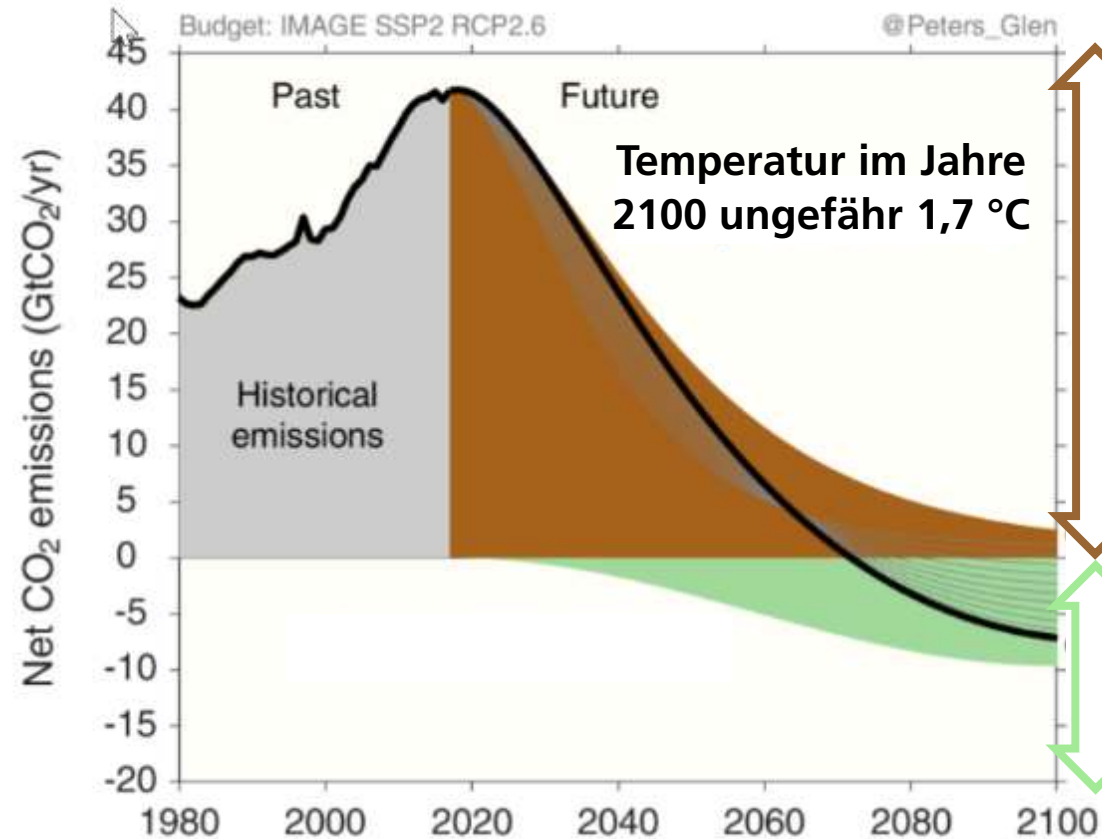
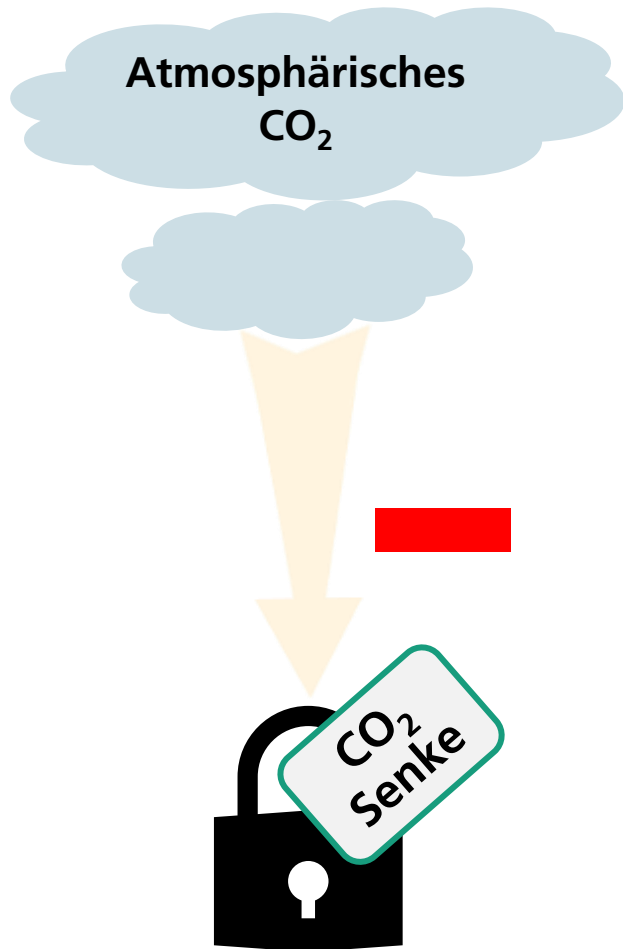
- 1 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
- 2 Rolle der Photovoltaik im Erneuerbaren Energiesystem
- 3 Atomausstieg in Deutschland
- 4 **Negative Emissionen**
- 5 Zusammenfassung





# Defossilierung und CO<sub>2</sub>-Entnahme

## Einführung

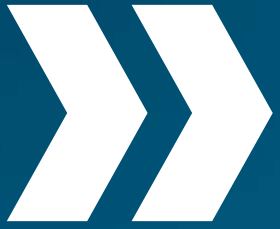


## Handlungsfeld

### Defossilierung:

- Vermeidung
- Reduktion
- Ressourceneffizienz
- Kreislaufwirtschaft
- Suffizienz

CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre

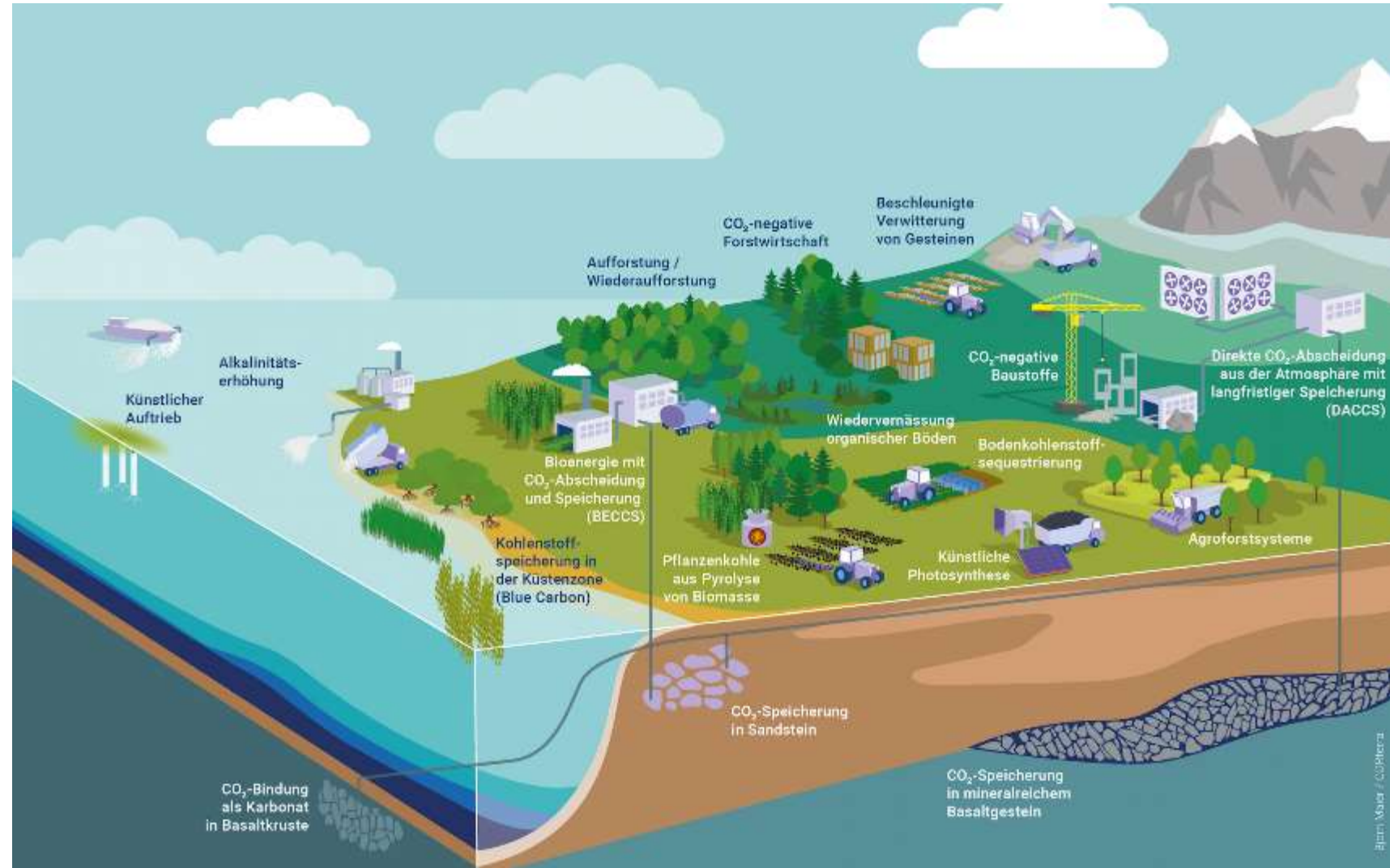


**»Negative Emissionen werden durch menschliche Aktivitäten erzielt, die der Atmosphäre CO<sub>2</sub> oder andere Treibhausgase entziehen und diese möglichst dauerhaft in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten speichern.«**

*Zitat aus dem Eckpunktepapier des BMWKs »Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe)«, Februar 2024*

# CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre

Welche Methoden zur CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre gibt es?



# Negative Emissionsmethoden

Eine unvollständige Methodenübersicht

**Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS)**



**Biochar Carbon Removal (BCR/Biochar)**



**Direct Air Capture Carbon Capture and Storage (DACCS)**



→ Wir werden all diese Methoden brauchen.

→ Alle Methoden haben Vor- und Nachteile.

**beschleunigte Verwitterung**



**Aufforstung/Wiederaufforstung**



**Boden-Kohlenstoff-Anreicherung**

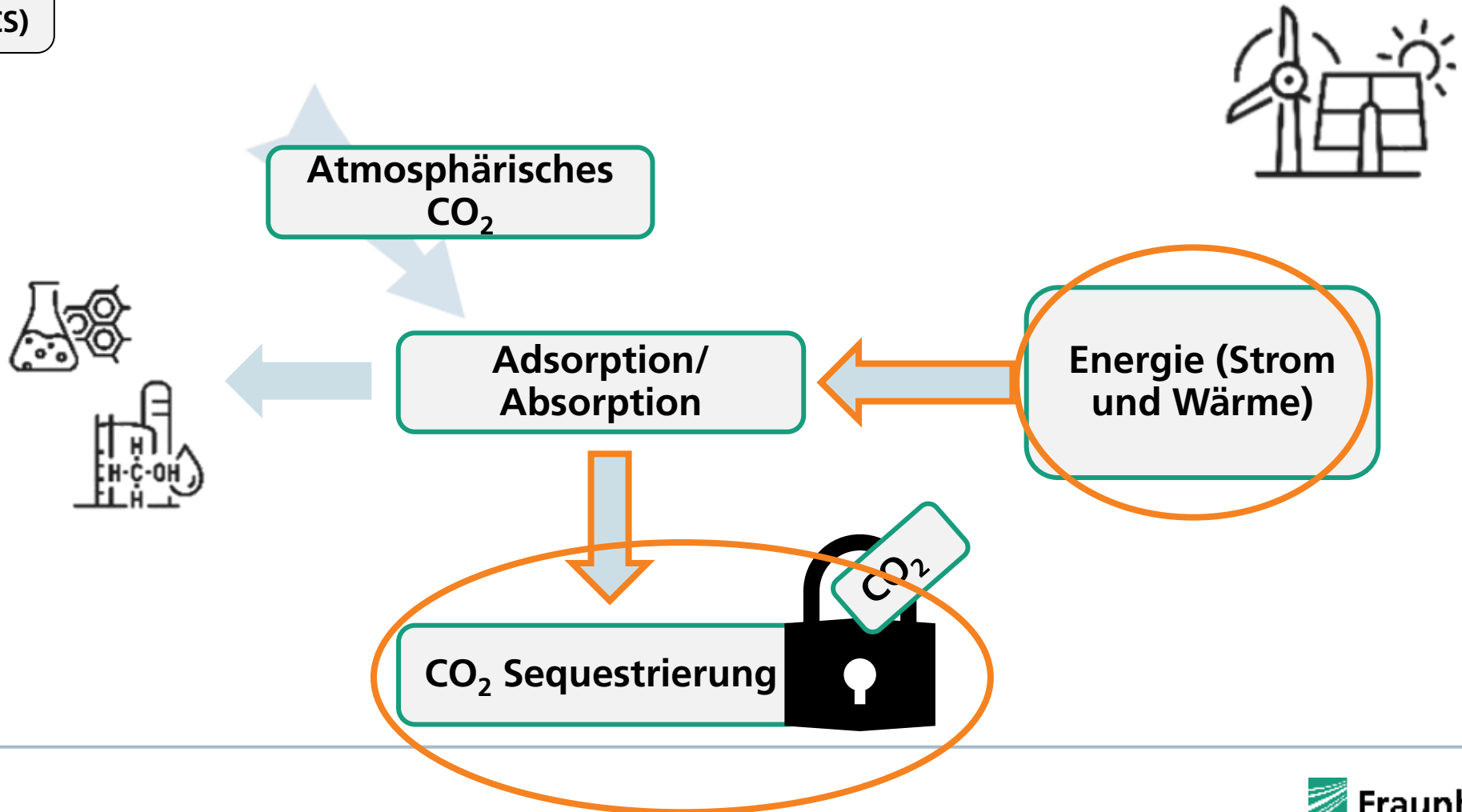
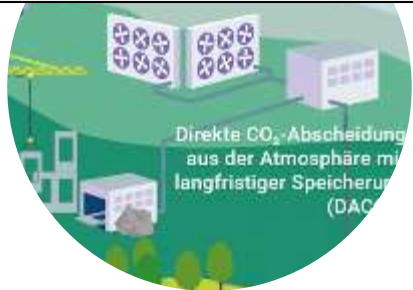


**Ozean Alkalisierung**



# DACCS im Kontext Erneuerbarer Energiesysteme

Direct Air Capture Carbon  
Capture and Storage (DACCS)



# Biochar und BECCS im Kontext Erneuerbarer Energiesysteme

Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS)

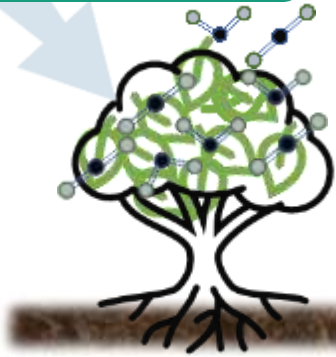


Biochar Carbon Removal (Biochar/ BCR)



Photosynthese

Atmosphärisches CO<sub>2</sub>



Reststoff Biomasse

Biochar



Pyrolyse

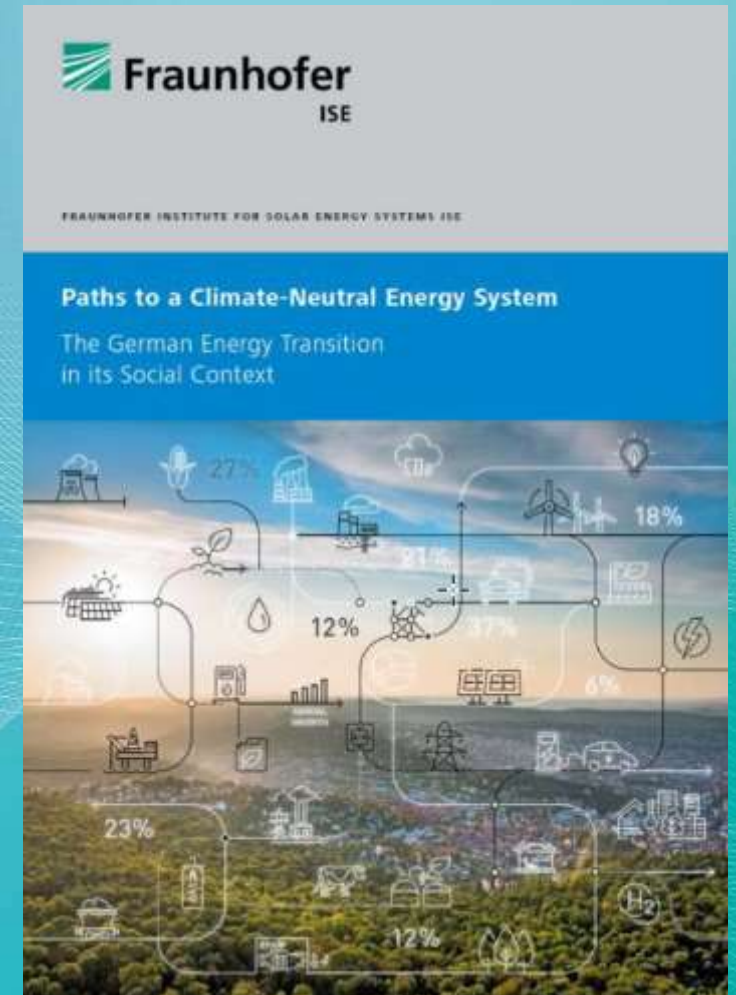
andere Konversions-Technologien

Energie (Wärme/Strom) und Gas, Öl

CO<sub>2</sub> Sequestrierung



# Negative Emissionstechnologien (NET) als Teil der Erneuerbaren Energiesysteme-Systeme - REMod Simulationen



# Integrierte Analyse von NET im Gesamtsystemmodell REMod

## Integration von NET:

- BECCS: Biomassekraftwerk mit Fernwärme-, Stromauskopplung und CO<sub>2</sub>-Sequestrierung<sup>1</sup>
- BCR: Biomassepyrolyse mit Fernwärmeauskopplung und Biochar<sup>2</sup>
- DACCS: Flexible „Low Temperature“-Direktabscheidung

**DACCS**

Wärme

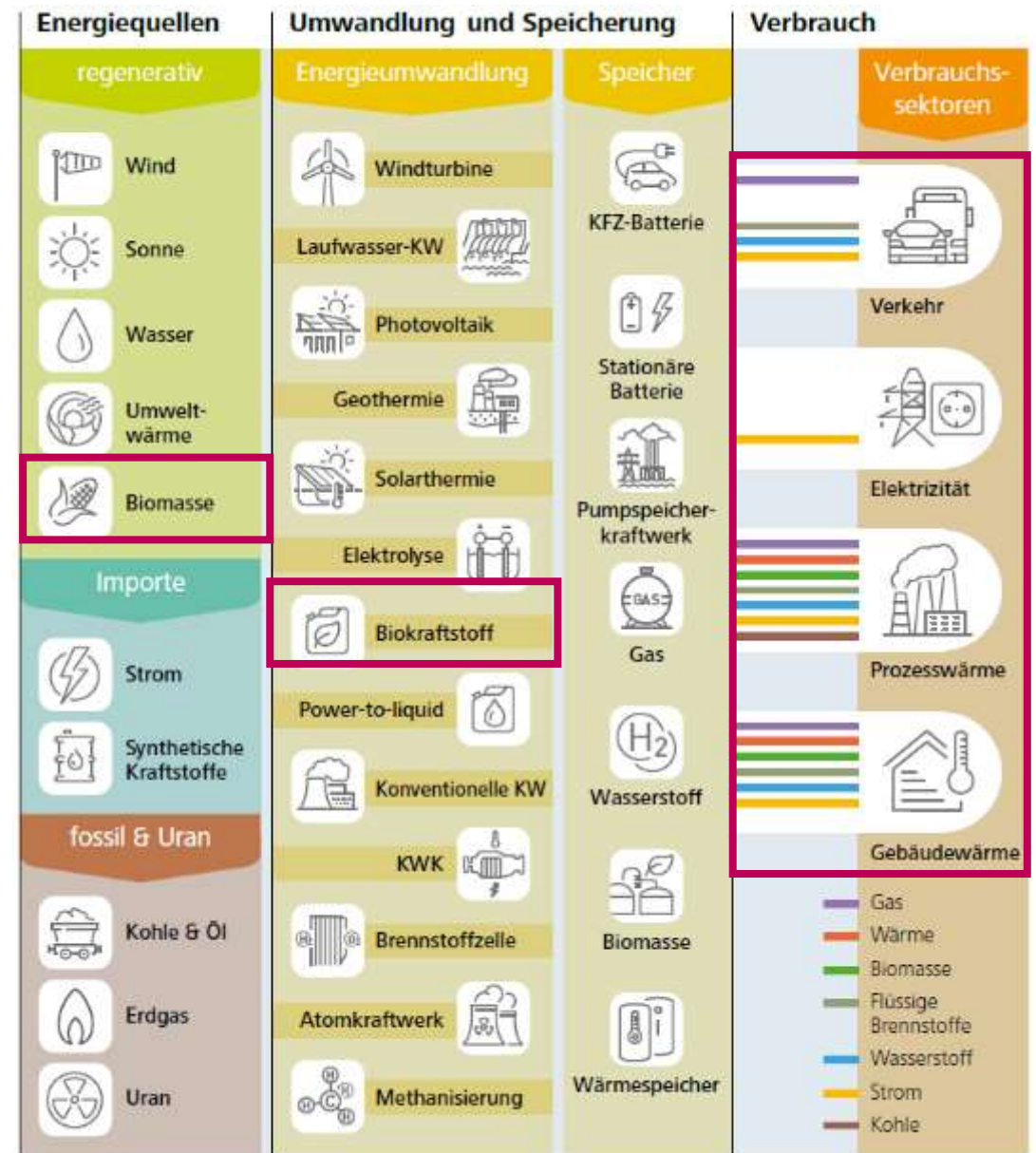
**BECCS**

Strom

**BCR**

Biomasse

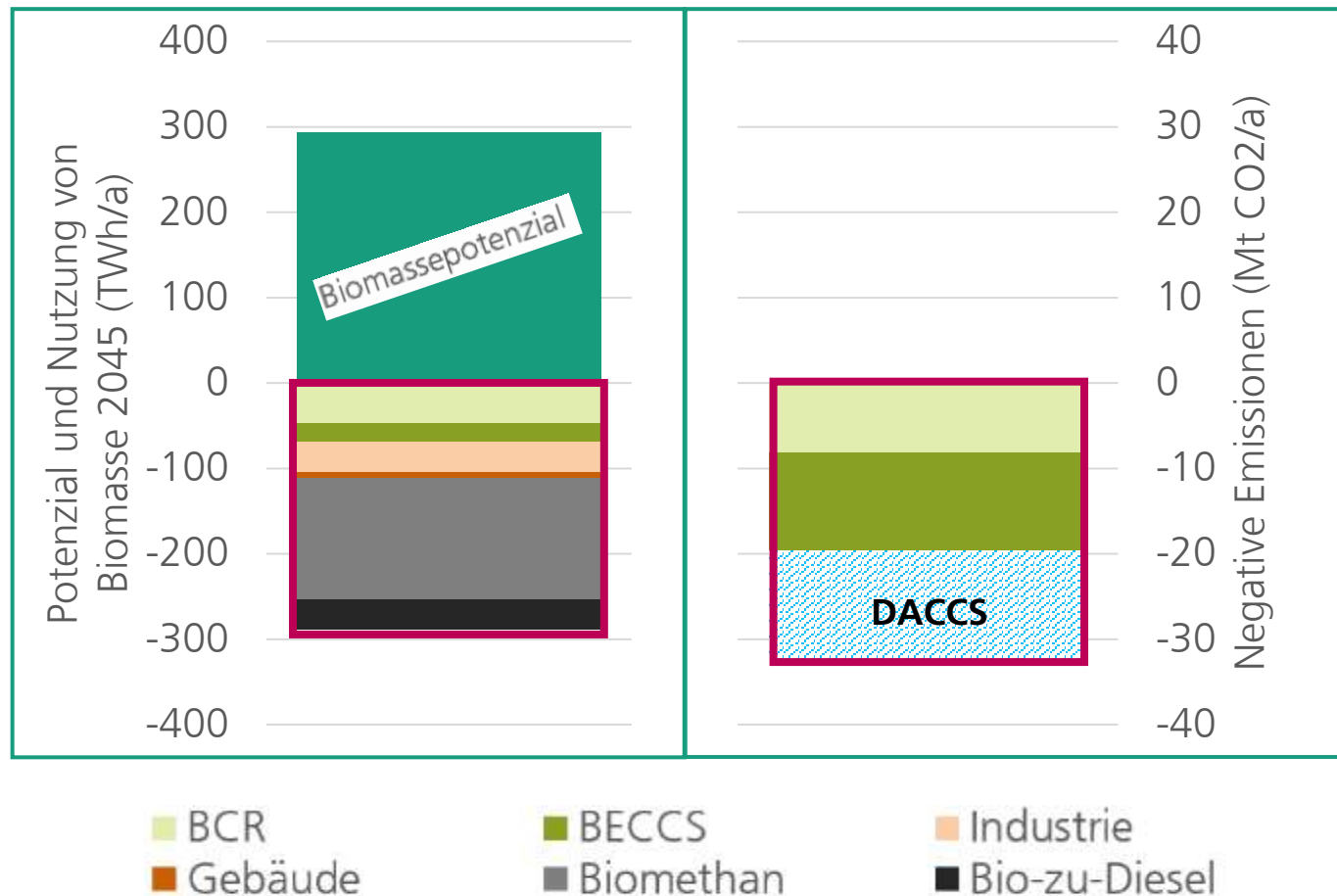
CO<sub>2</sub>





# Biomasse-basierte NETs stehen in Konkurrenz um nachhaltige Biomasse

Ein Beispiel Szenario für Deutschland 2045, CO<sub>2</sub>-neutral



## Biomasseeffizienz

- Konkurrenz um nachhaltige Biomasse: Nutzen für 1) THG-neutrale Endenergie, 2) Biomethan und Biokraftstoffe, 3) NET
- NET nötig, um schwer vermeidbare Residualemissionen zu kompensieren
- Biomasseeffizienz entscheidend für NET

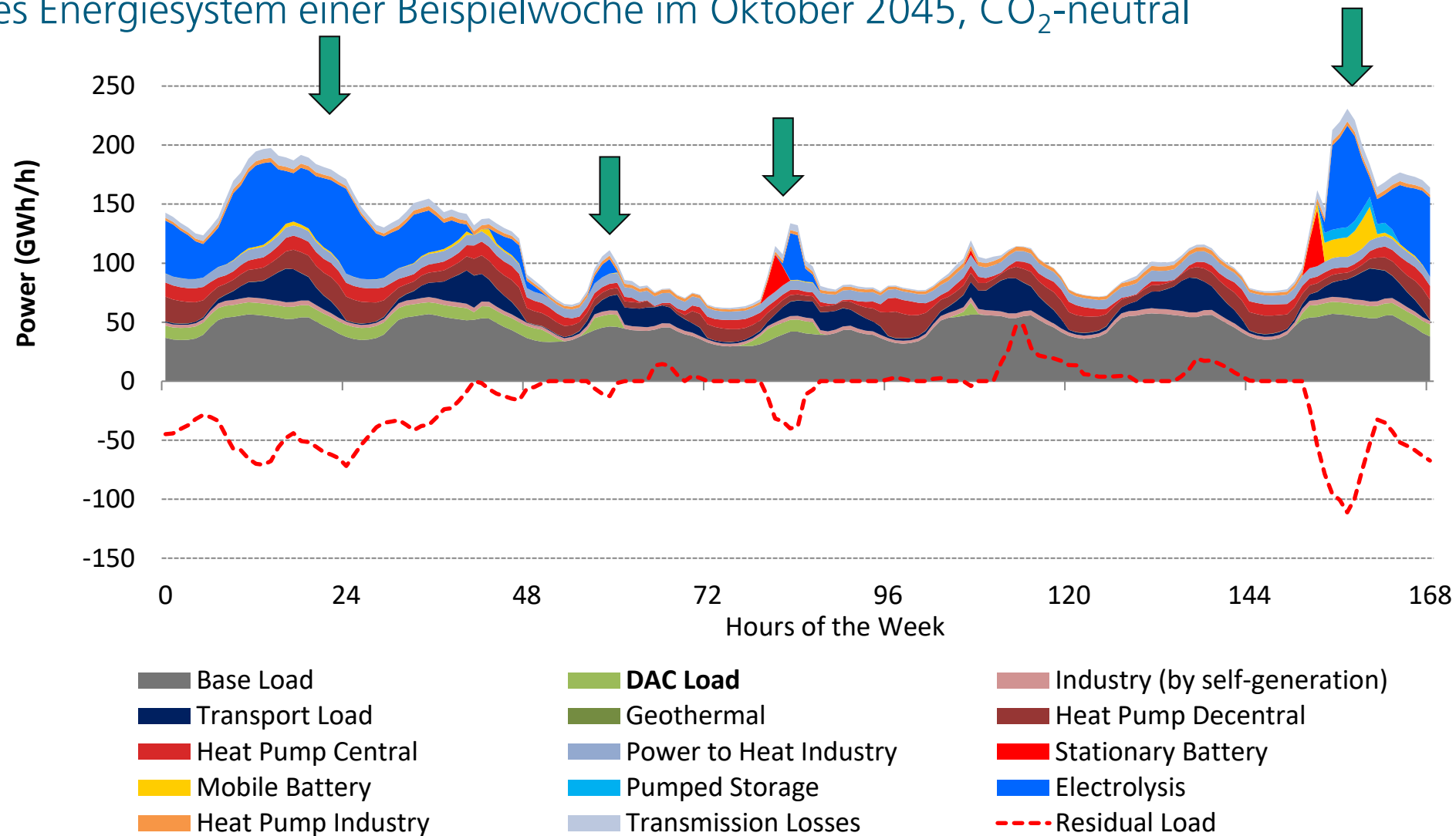
## Einflussfaktoren auf NET-Ausbaupfad

- nachhaltiges Biomassepotenzial
- Biomasseeffizienz der einzelnen NET
- Technologieverfügbarkeit
- schwer vermeidbare Residualemissionen

# DACCS als flexibler Verbraucher

Stromverbrauch deutsches Energiesystem einer Beispielwoche im Oktober 2045, CO<sub>2</sub>-neutral

DACCS kann flexibel Strom aus EE nutzen.



# Agenda

- 1 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
- 2 Rolle der Photovoltaik im Erneuerbaren Energiesystem
- 3 Atomausstieg in Deutschland
- 4 Negative Emissionen
- 5 **Zusammenfassung**



# Zusammenfassung

1

Photovoltaik ist eine zentrale Säule im zukünftigen Erneuerbaren Energiesystem.

2

Agri-PV ist ein Beispiel einer Doppelnutzung von Flächen, bei der die Landwirtschaft und die Energiewende profitiert.

3

Der Atomausstieg in Deutschland ist erfolgreich vollzogen.

4

Auch Negative Emissionen werden in klimaneutralen EE-Systeme eine zentrale Rolle spielen.

**Biochar Carbon dioxide Removal (Biochar/ BCR)**



**Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS)**



**Direct Air Capture Carbon Capture and Storage (DACCS)**



Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!

---

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

Danke an die Kolleg\*innen Saskia  
Pospischil-Kühnhold, Markus Kaiser +  
Christoph Kost und Bruno Burger