

# DEUTSCHLAND AUF DEM WEG ZUR KLIMANEUTRALITÄT: EINE KOSTENOPTIMALE STRATEGIE FÜR EINE TREIBHAUSGASNEUTRALE ENERGIEVERSORGUNG

16.02.2022 | 17. Symposium Energieinnovation – EnInnov2022

Thomas Schöb, Peter Markewitz, Leander Kotzur, Detlef Stolten

IEK-3: Techno-ökonomische Systemanalyse

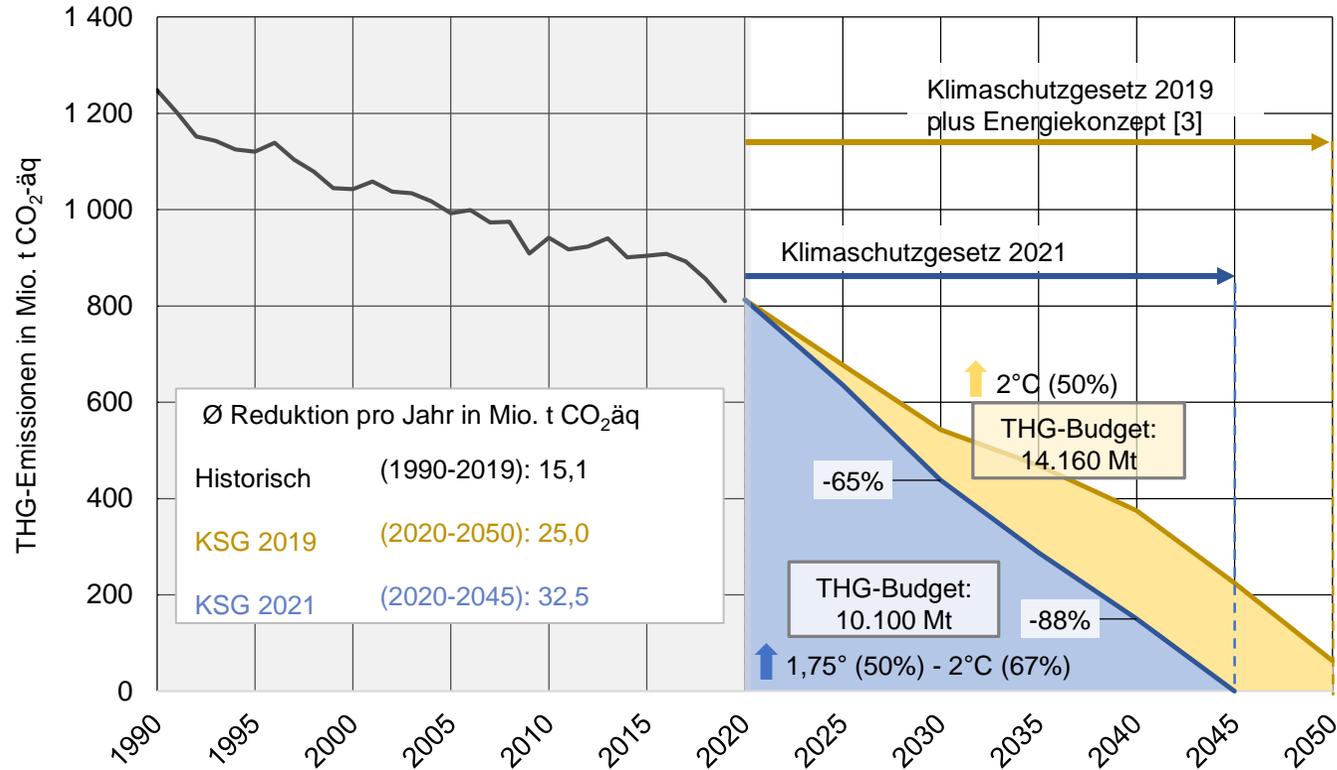
---

# Agenda

- ▶ Szenariodefinition und Annahmen
- ▶ Modelle und Methodik
- ▶ Eine treibhausgasneutrale Energieversorgung für Deutschland bis 2045
- ▶ Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

# Szenariodefinition und Annahmen

Historische Entwicklung der Treibhausgasemissionen [1] und Reduktionsziele nach dem Klimaschutzgesetz [2]



- ▶ Wie können die Klimaschutzziele kostenoptimal erreicht werden?
- ▶ Wie kann der Pfad zu einer treibhausgasneutralen Energieversorgung aussehen?

[1] P. Gniffke: Vorjahres schätzung der deutschen Treibhausgas-Emissionen für das Jahr 2020, Umweltbundesamt, März 2021

[2] Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S.2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist.

[3] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, 2010

## Treibhausgasneutrales Szenario für Deutschland bis 2045 („Netto Null“)

### Grundlegende Annahmen und Rahmenbedingungen

- ▶ Treibhausgasminderungsziele ab 2030 entsprechend dem Klimaschutzgesetz [1], keine Vorgabe von Zielen für einzelne Sektoren
- ▶ Exogener Emissionspfad für THG-Emissionen der Landwirtschaft:

| THG-Emissionen<br>in Mio. t CO <sub>2äq</sub> | 2020                      | 2030                      | 2040                      | 2045                     |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Landwirtschaft [2]                            | 62,2 Mt CO <sub>2äq</sub> | 54,9 Mt CO <sub>2äq</sub> | 50,1 Mt CO <sub>2äq</sub> | 47,6Mt CO <sub>2äq</sub> |

- ▶ Jährliches BIP-Wachstum von 1,2%, steigende Güterverkehrs- und Wohnflächennachfrage
- ▶ Hybrider Ansatz für den Zinssatz: 2,5% für private Investitionen, 6% für Investitionen der Industrie

[1] Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S.2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist.

[2] K. Purr et al.: Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 – Hintergrundpapier, Umweltbundesamt, 2013

**Kernmodell**



**Integriertes  
Energiesystemmodell  
ETHOS/NESTOR**

**Methode**

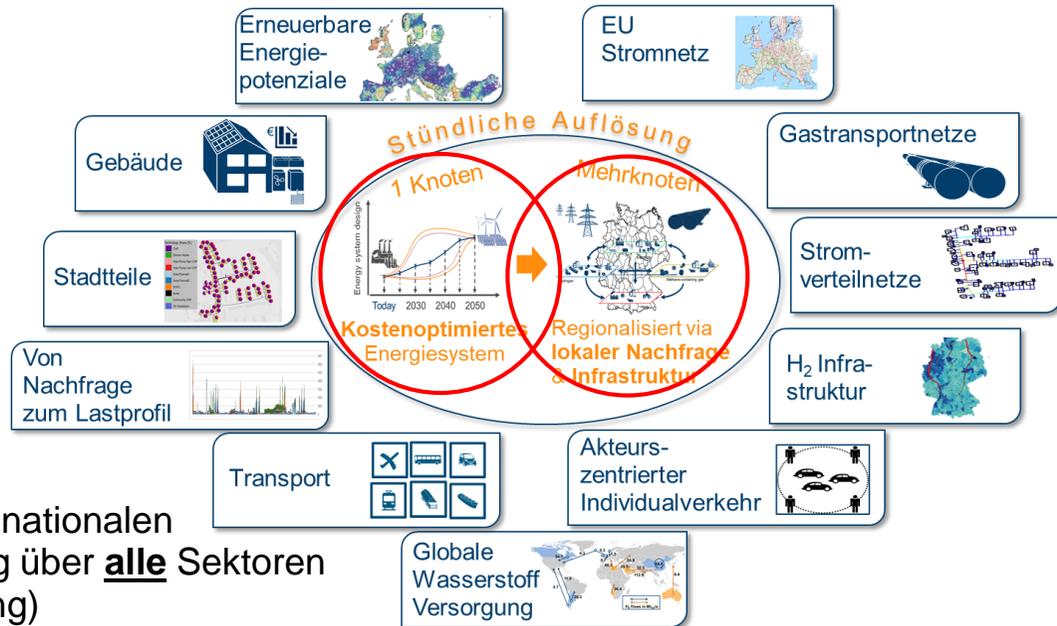


- Optimierung** der nationalen Energieversorgung über **alle** Sektoren (Kostenminimierung)
- Optimierte** H<sub>2</sub>-Infrastrukturanalyse

**Ergebnis**

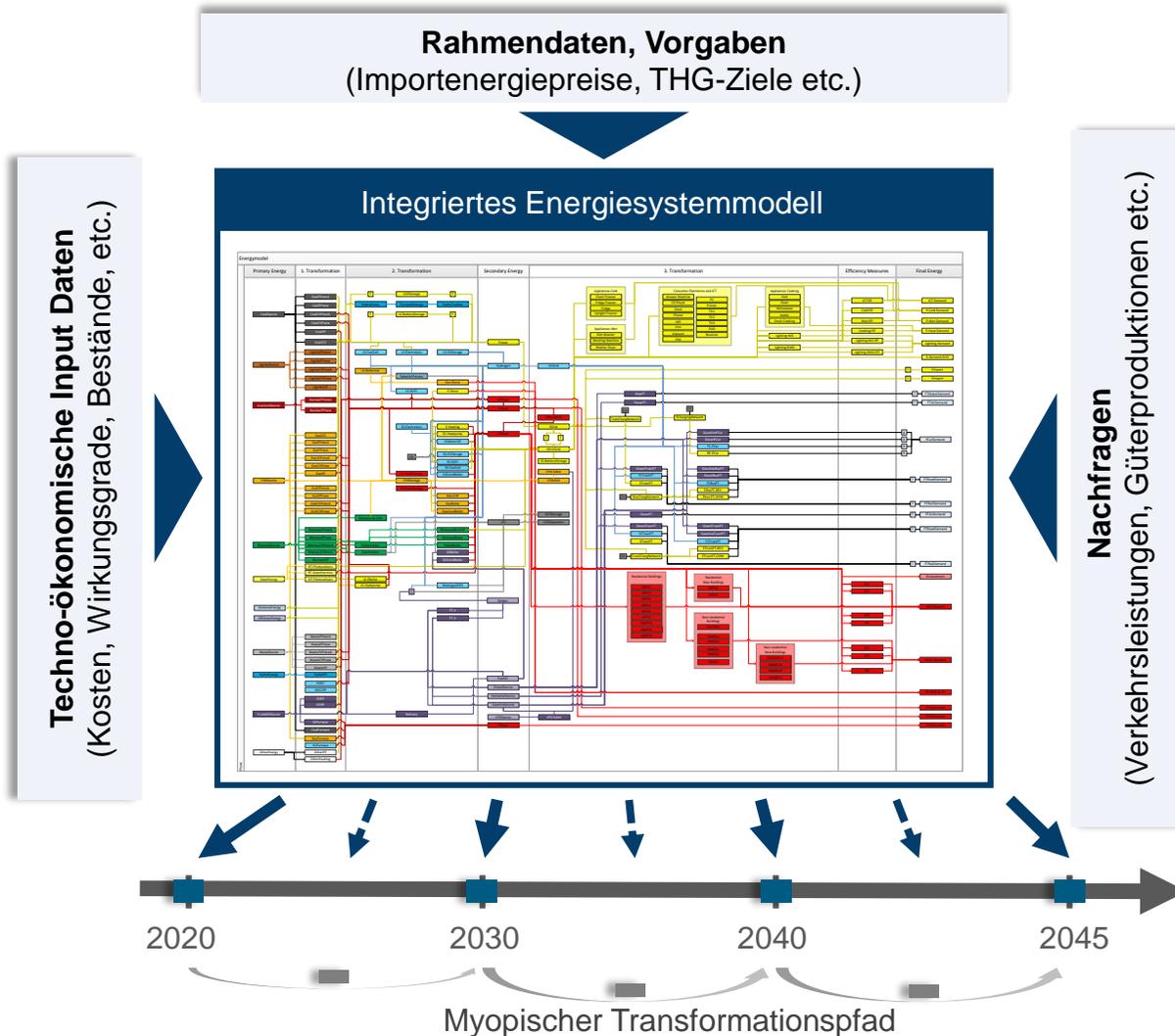


**Kostenoptimales** Szenario unter den gesetzten Randbedingungen „Allwissender Planer“



NESTOR: National Energy System with Sector Coupling

# Das ETHOS / NESTOR-Modell



## Ansatz und Merkmale

- Hybrider bottom-up Ansatz
- Berücksichtigung von Kostenunsicherheiten durch quadratische Programmierung
- Stündliche Auflösung
- Detaillierte Abbildung von:
  - Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude und Verkehr
  - PtX Technologien
  - Energiespeicher
  - CO<sub>2</sub> Abscheidung u. Speicherung
  - ...

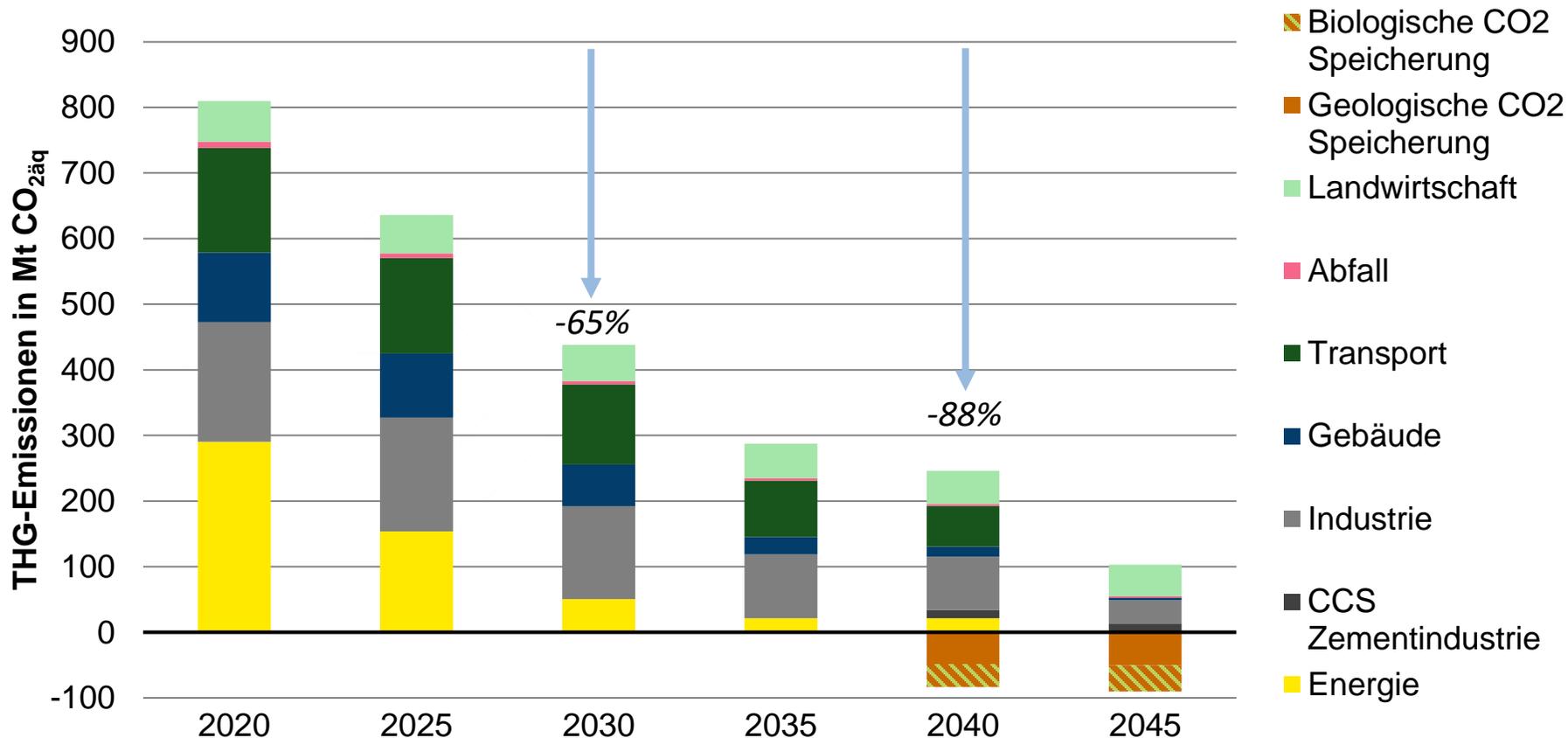
## Methode

### Kostenoptimierung

„Alle Minderungsmaßnahmen stehen miteinander im Wettbewerb“

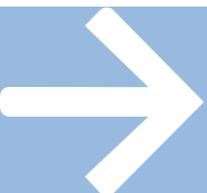
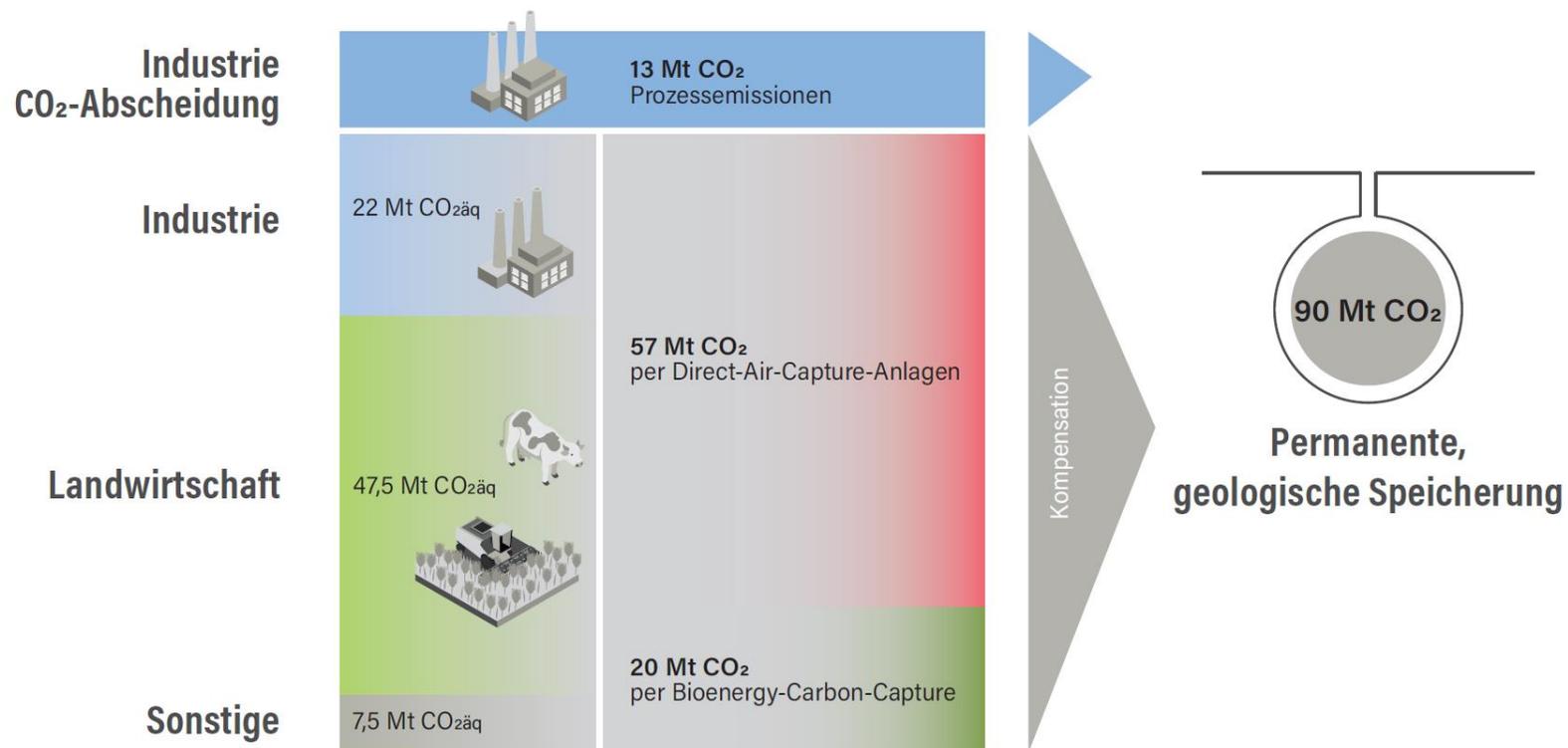
NESTOR: National Energy System with SectOR Coupling

# Entwicklung der Treibhausgasemissionen



➤ Treibhausgasneutralität ist nur mit permanenter geologischer CO<sub>2</sub> Speicherung zu erreichen

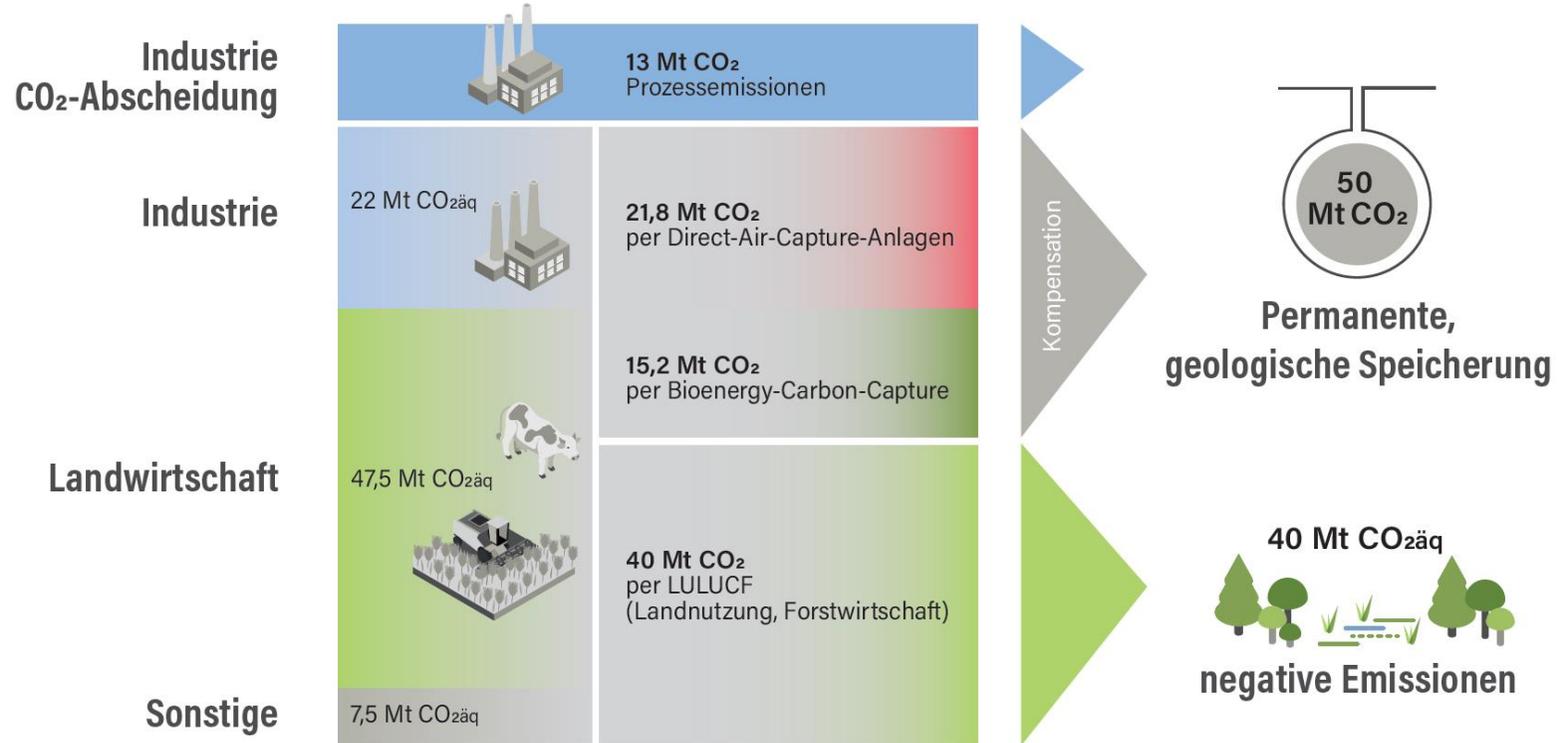
# Jährlicher geologischer CO<sub>2</sub> Speicherbedarf **ohne** LULUCF Maßnahmen im Jahr 2045



▶ Jährliche geologische CO<sub>2</sub> Speicherung von ca. 90 Mio.t im Jahr 2045

LULUCF: Land use, Land-use change and Forestry (Landnutzung, Forstwirtschaft etc.)

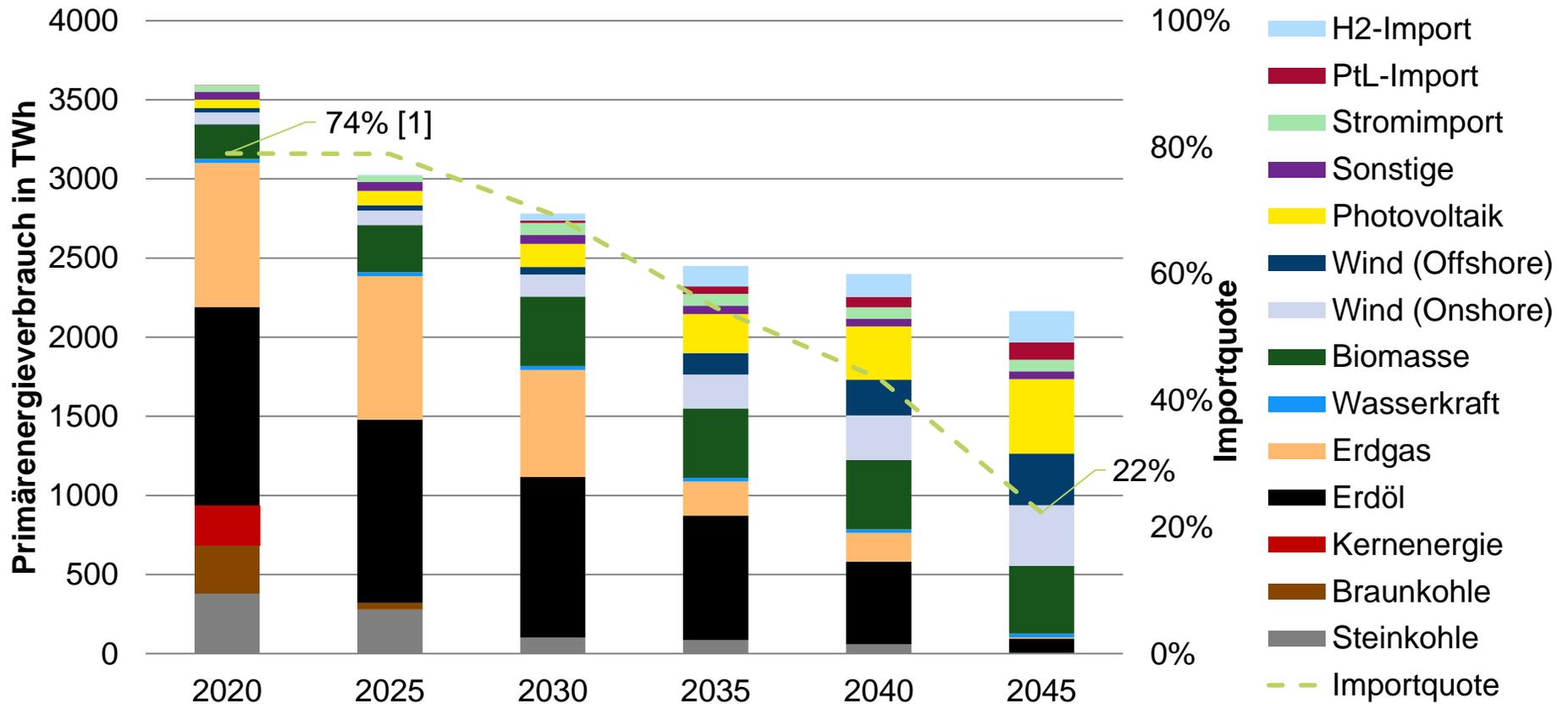
# Jährlicher geologischer CO<sub>2</sub> Speicherbedarf **mit** LULUCF Maßnahmen im Jahr 2045



➤ Selbst mit LULUCF-Maßnahmen ist eine geologische CO<sub>2</sub> Speicherung notwendig: 50 Mio. t/a

➤ Kohlendioxidspeichergesetz (KSpG) verhindert derzeit CO<sub>2</sub> Speicherung weitestgehend

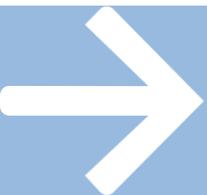
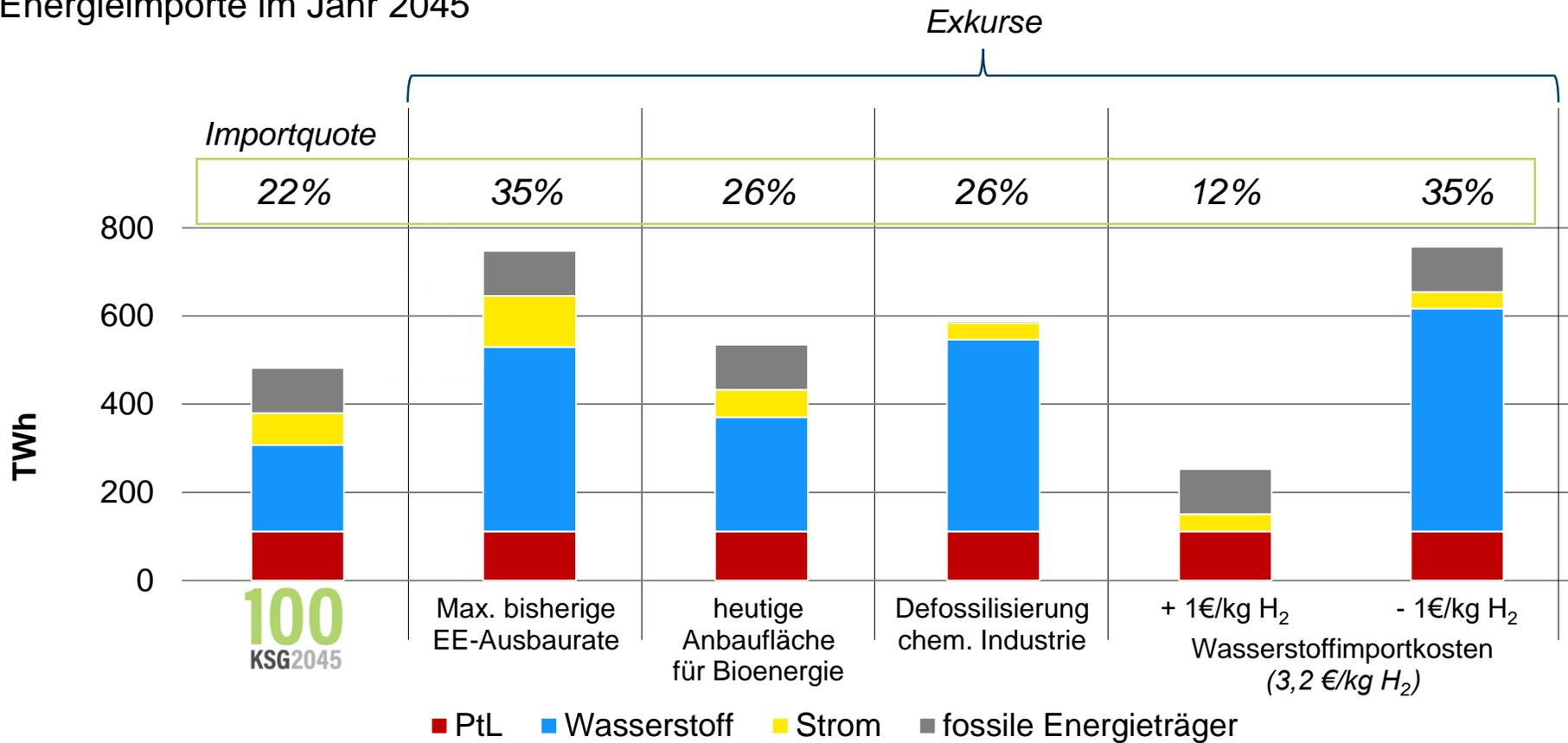
## Primärenergieverbrauch (inkl. nicht-energetischer Bedarf) und Importquote



- ▶ Transformation vom fossilen zum erneuerbaren Energiesystem innerhalb von 25 Jahren
- ▶ Größere Unabhängigkeit von Energieimporten

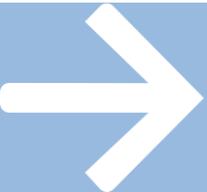
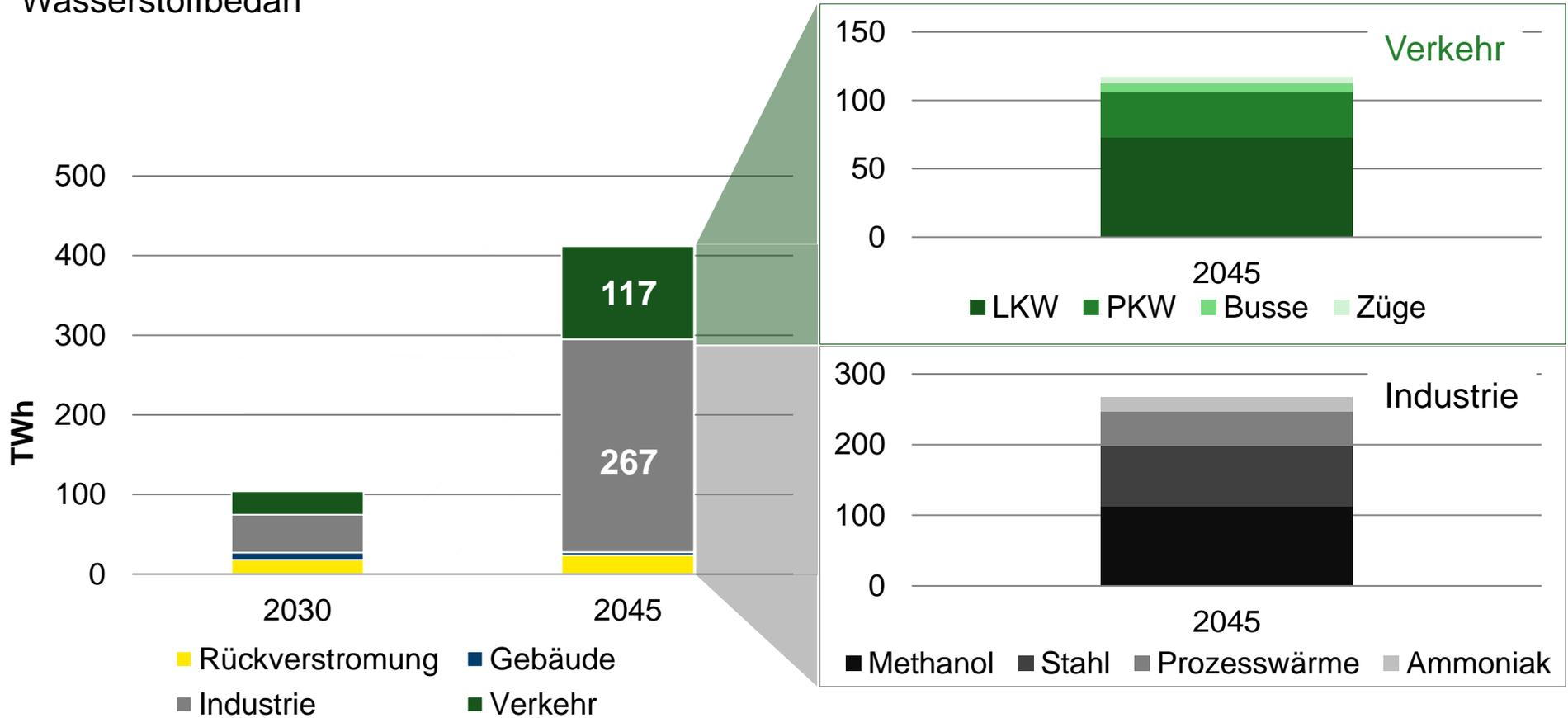
[1] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): Bilanz 2019, Apr. 2021. Verfügbar unter: <https://ag-energiebilanzen.de/>

# Energieimporte im Jahr 2045



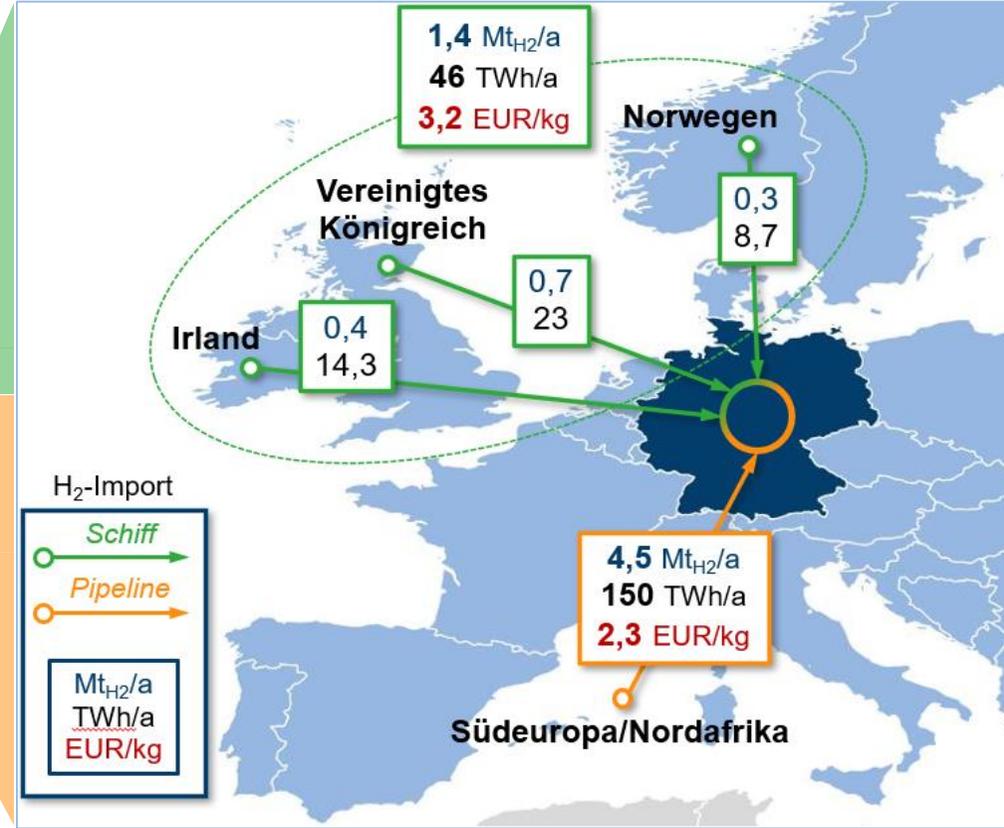
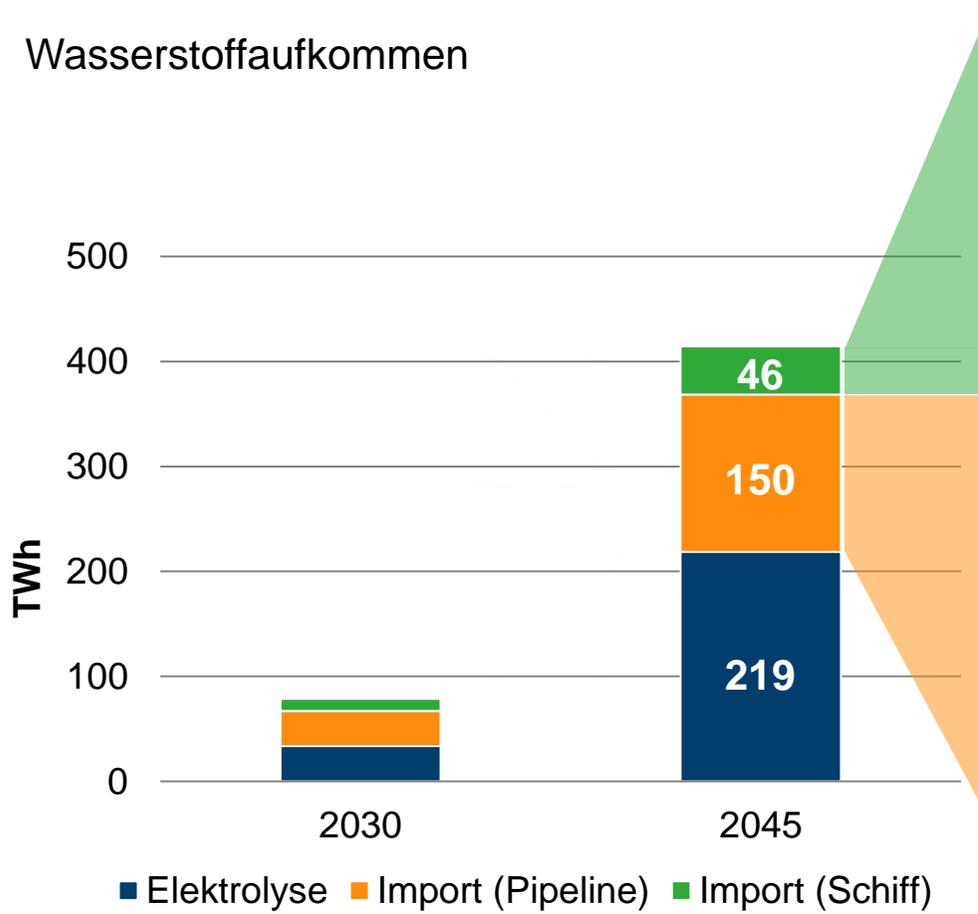
▶ Maximal rund ein Drittel des Energieaufkommens muss im Jahr 2045 importiert werden

# Wasserstoffbedarf



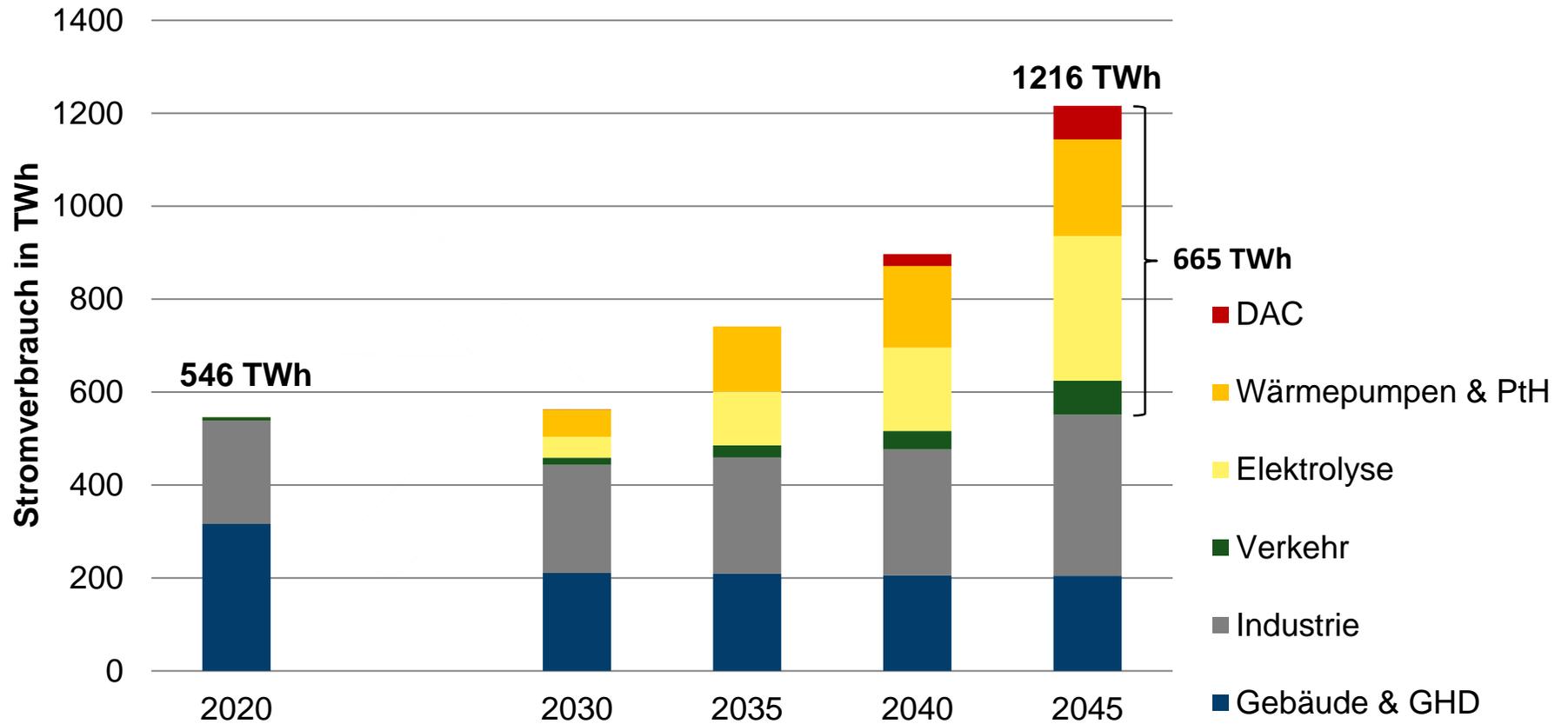
▶ Etwa 70% des zukünftigen Wasserstoffbedarfs entfällt auf die Industrie

# Wasserstoffaufkommen



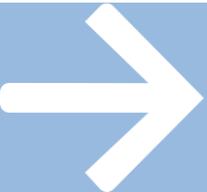
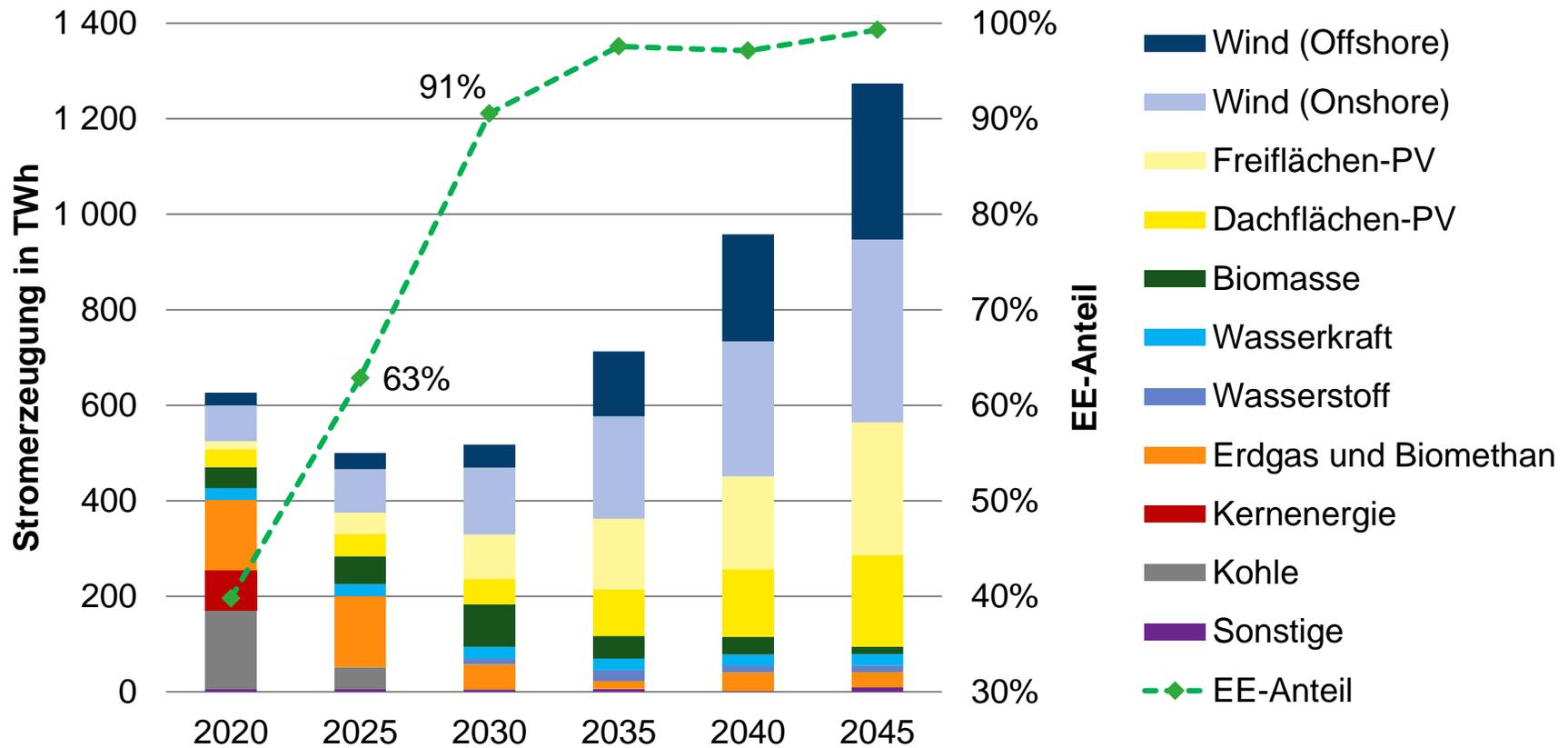
➤ Kostenoptimal wird 47% des Wasserstoffs importiert  
 ➤ Inländische Wasserstoffproduktion ist ebenfalls ökonomisch darstellbar

## Stromverbrauch



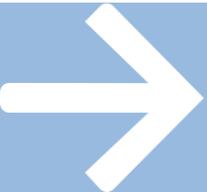
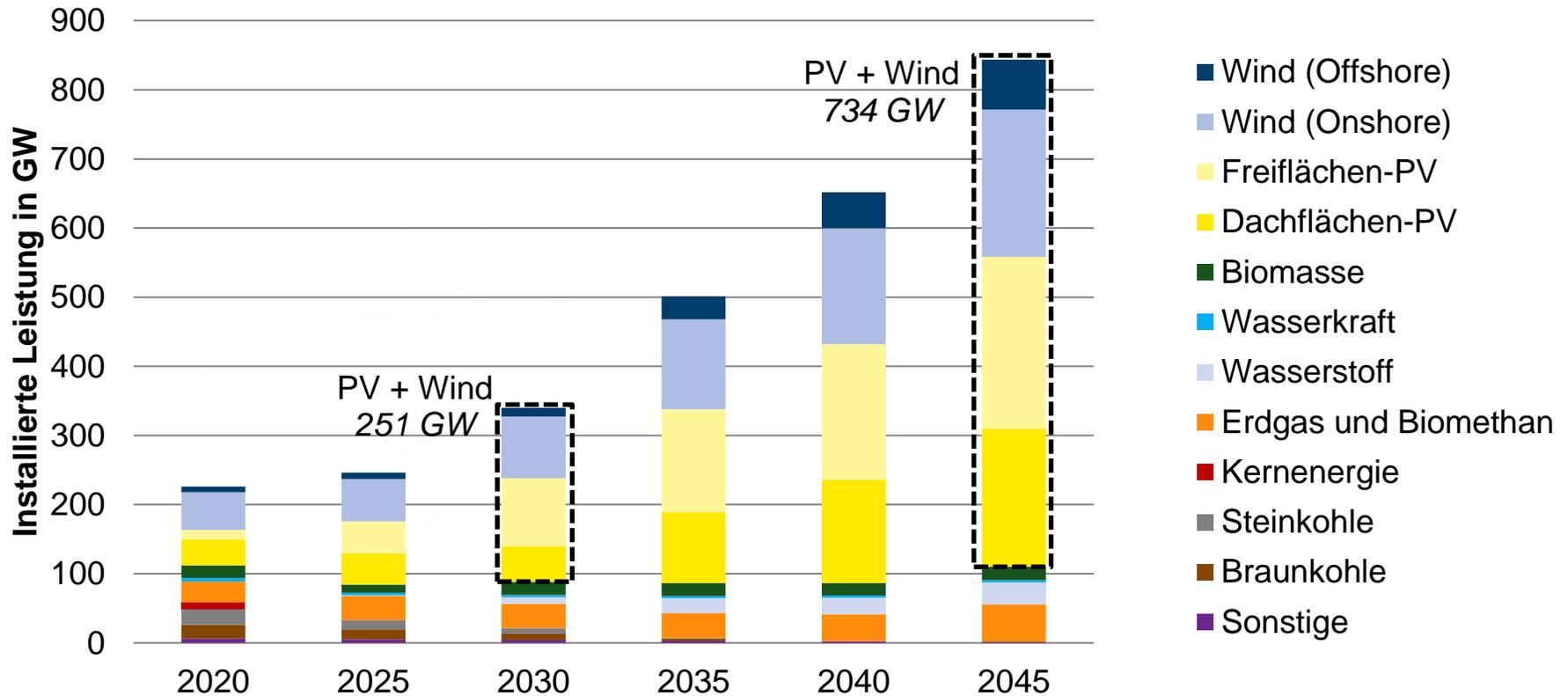
- ▶ Sektorkopplung verdoppelt Stromverbrauch in Deutschland
- ▶ Effizienzmaßnahmen verhindern einen stärkeren Anstieg des Stromverbrauchs

# Stromerzeugung



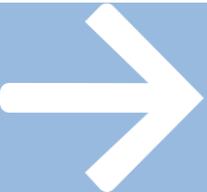
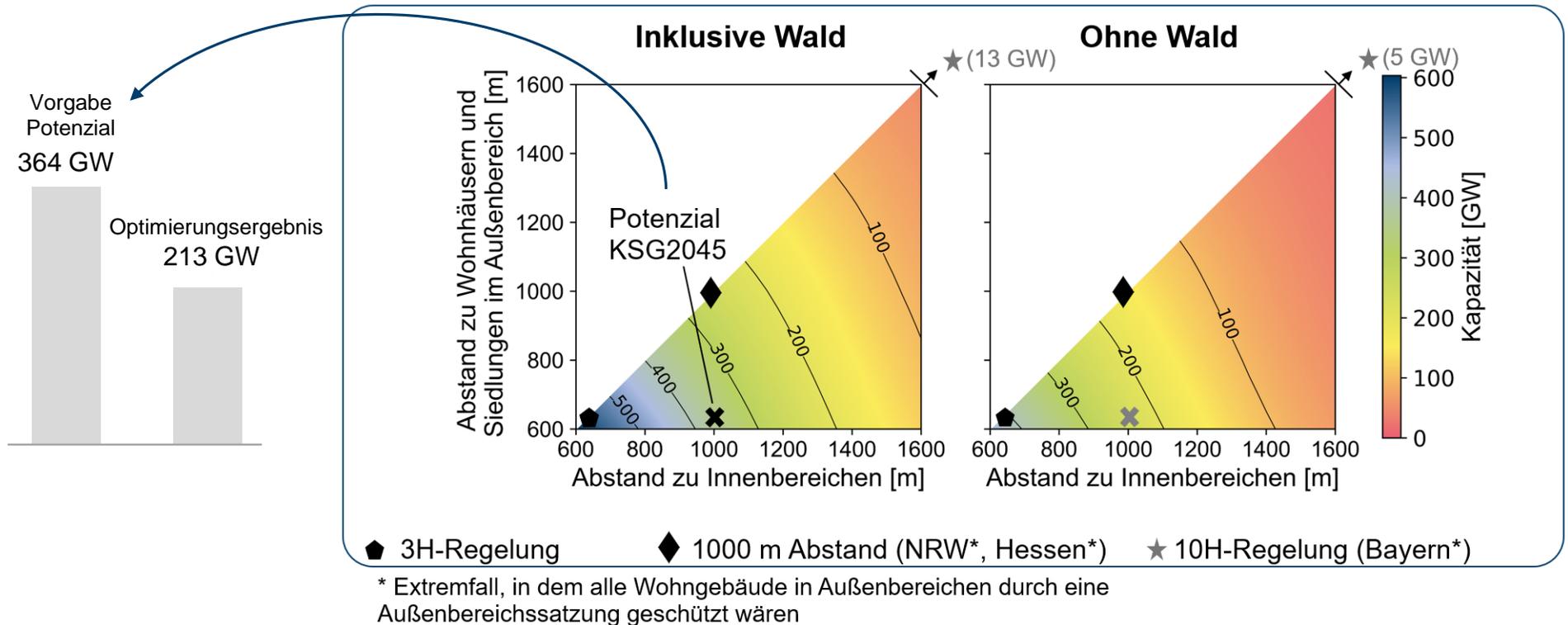
- ▶ Ausschöpfen der Stromeffizienzpotenziale bedeutet geringere Erzeugung (2025-2030)
- ▶ Schnelle Dekarbonisierung der Stromerzeugung ist Voraussetzung für Sektorkopplung

# Installierte Erzeugungskapazität im Stromsektor



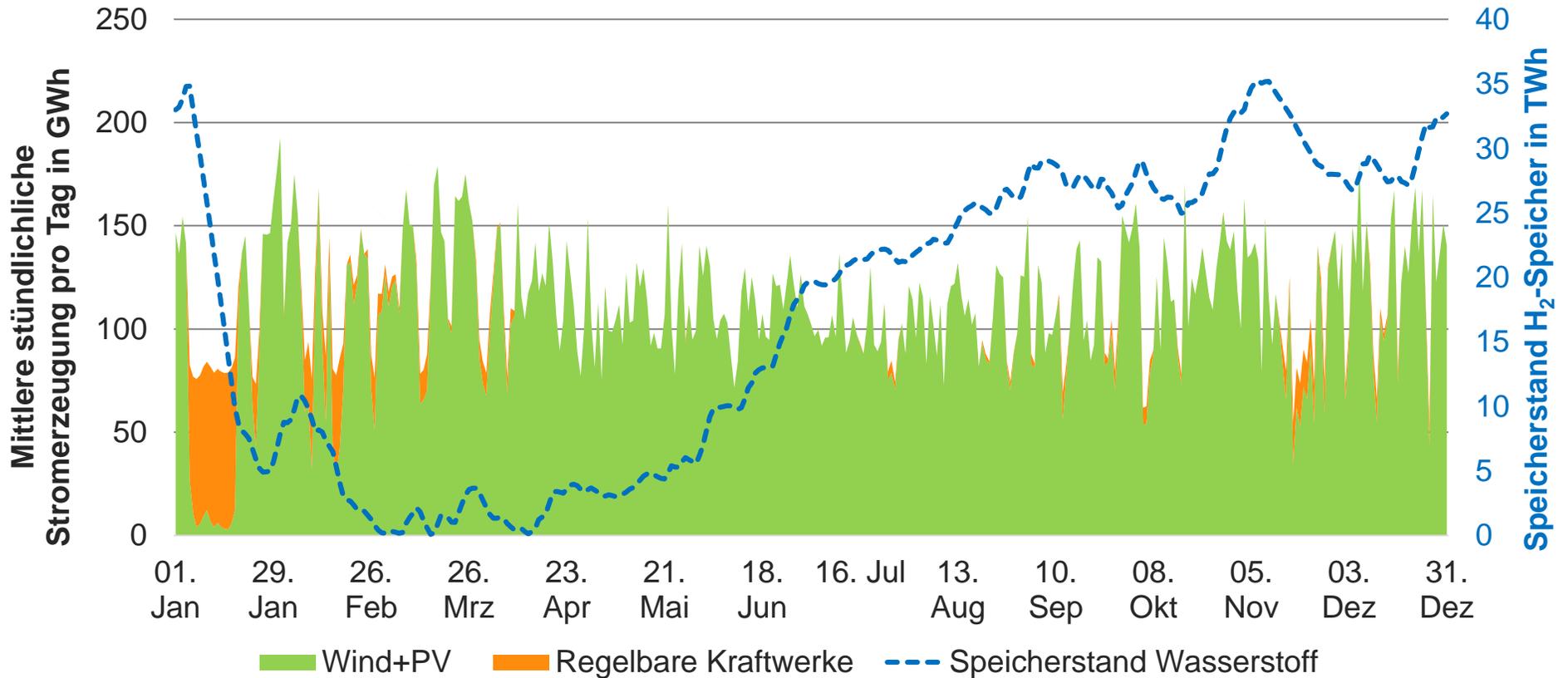
- ▶ Verdopplung der heutigen Windkraft- und PV-Kapazität bis 2030
- ▶ Anteil PV (Freifläche und Dachfläche) im Jahr 2045: 53%

# Potenzialanalyse Windkraft-Onshore



- ▶ Das analysierte Potenzial für Wind-Onshore (364 GW) wird nur zu 59% ausgeschöpft
- ▶ Selbst unter Ausschluss der Waldflächen wäre genug Windenergiepotenzial vorhanden

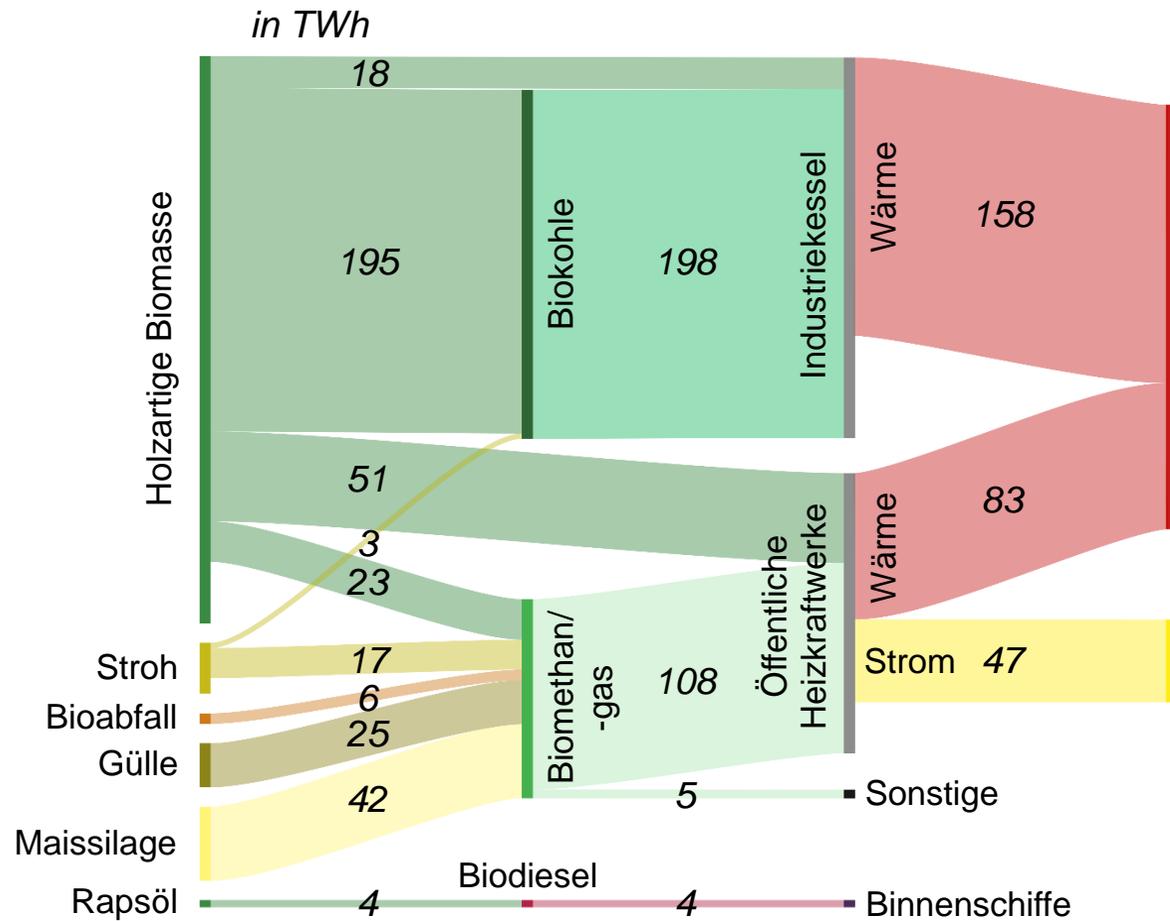
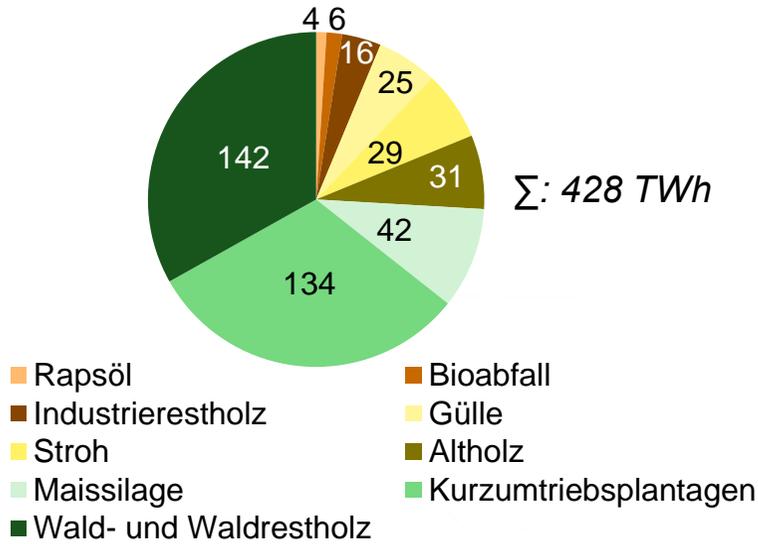
## Langzeitspeicherung im Jahr 2045



- ▶ Wasserstoffspeicher sind notwendig zur Überbrückung von Dunkelflauten
- ▶ Speicherkapazität (saline Speicher) ist vorhanden

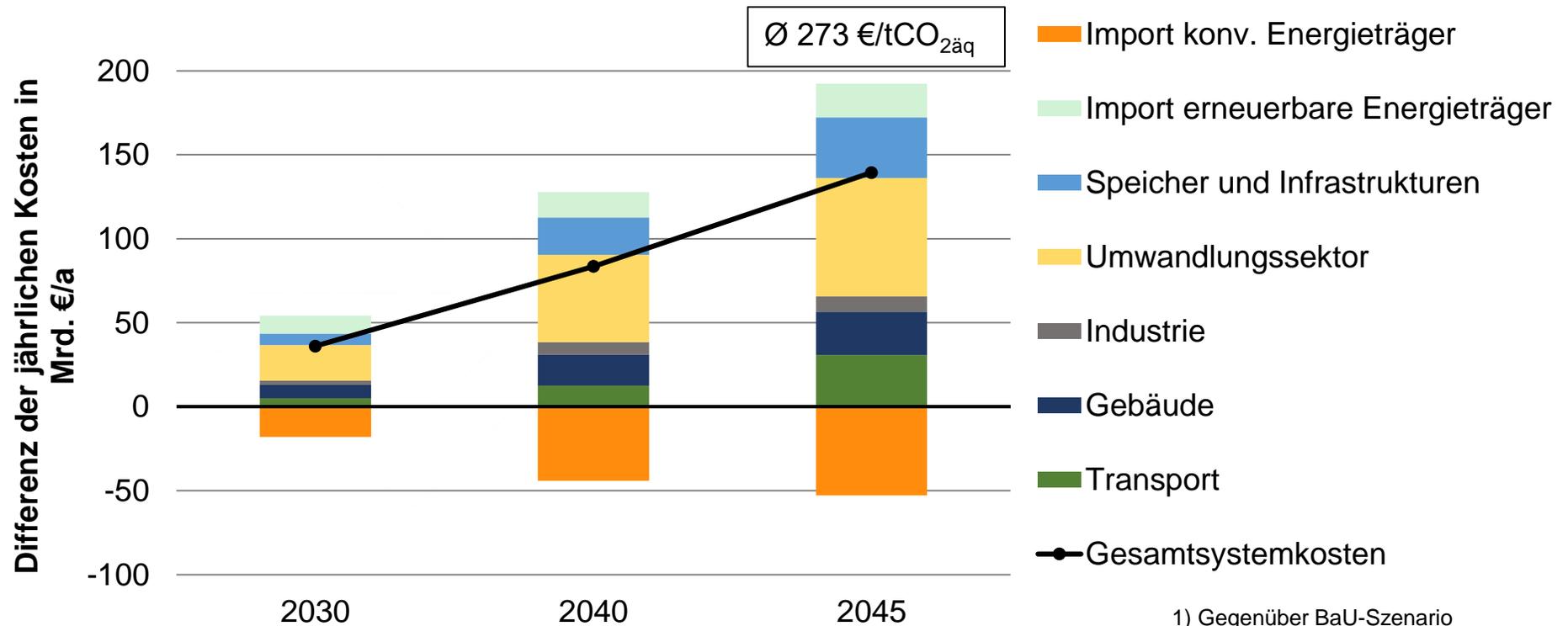
# Aufkommen und Nutzung von Bioenergie

## Bioenergieaufkommen im Jahr 2045



- ▶ Vergrößerung der Anbaufläche (Nutzung von Grünflächen) und höhere spezifische Erträge
- ▶ Erschließung neuartiger Bioenergieträger ist notwendig (z.B. Stroh)

## Jährliche Mehrkosten<sup>1)</sup> für Treibhausgasneutralität



1) Gegenüber BaU-Szenario  
(abhängig von gewählten Zinssätzen)

- ▶ Starker Anstieg der Mehrkosten zum Ende des Zeitraums
- ▶ ca. 1 Billion € Mehrkosten der Transformation über 25 Jahre ggü. BaU-Szenario



➤ Transformation ist technisch und ökonomisch darstellbar  
 ➤ Handlungszeitraum: nur 25 Jahre – unverzügliches Handeln auf allen Ebenen

---

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Thomas Schöb  
Institut für Energie- und Klimaforschung  
Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3)  
Forschungszentrum Jülich

+49 171 4979702 (mobil/ Home-Office)

+49 2461 61-3079

[t.schoeb@fz-juelich.de](mailto:t.schoeb@fz-juelich.de)

[https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/Home/home\\_node.html](https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/Home/home_node.html)

Auf unserer Webseite finden  
Sie weitere Informationen zu  
dieser Studie:

