

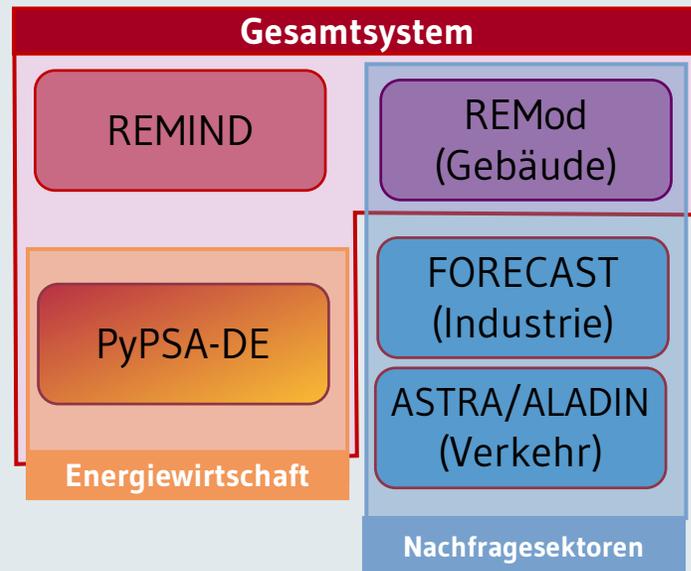
Webinar zum Ariadne-Szenarienreport, 6. März 2025

# DIE ENERGIEWENDE KOSTENEFFIZIENT GESTALTEN: SZENARIEN ZUR KLIMANEUTRALITÄT 2045

Gunnar Luderer, Tom Brown, Frederike Bartels, Clara Aulich, Falk Benke, Tobias Fleiter, Fabio Frank, Helen Ganal, Julian Geis, Norman Gerhardt, Till Gnann, Alyssa Gunnemann, Robin Hasse, Andrea Herbst, Sebastian Herkel, Johanna Hoppe, Christoph Kost, Michael Krail, Michael Lindner, Marius Neuwirth, Hannah Nolte, Robert Pietzcker, Patrick Plötz, Matthias Rehfeldt, Felix Schreyer, Toni Seibold, Charlotte Senkpiel, Dominika Sörgel, Daniel Speth, Bjarne Steffen, Philipp C. Verpoort



## Modellensemble



**REMIND:** Integriertertes Energie-Ökonomie-Klima Modell  
Deutschland im europäischen und globalen Kontext

**PyPSA-DE:** Gesamtsystemmodell mit hoher zeitlicher und  
räumlicher Auflösung von Stromsystems, Infrastrukturen,  
Sektorkopplung

**REMod:** Gesamtsystemmodell mit stündlicher Auflösung des  
Stromsystems, Sektorleitmodell für Gebäudewärme

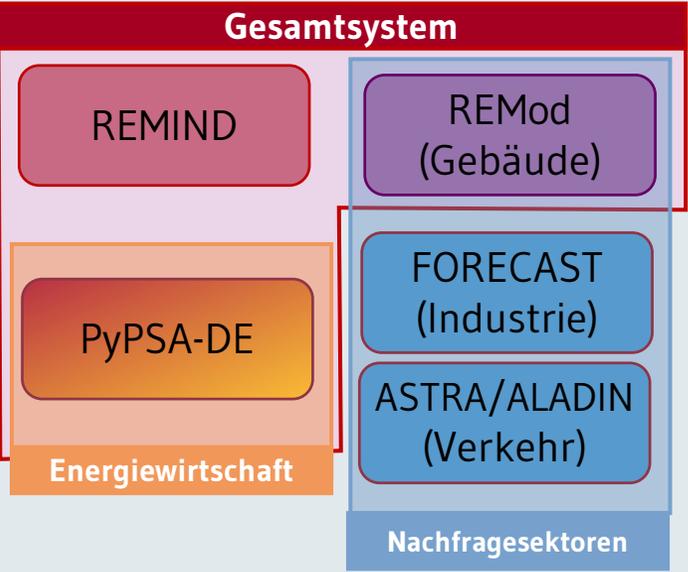
**FORECAST:** Bottom-up Modell Industrie

**ASTRA/ALADIN:** Verkehrsnachfrage und bottom-up  
Modellierung Antriebswende

GEFÖRDERT VOM

# METHODIK: MODELLE UND SZENARIEN

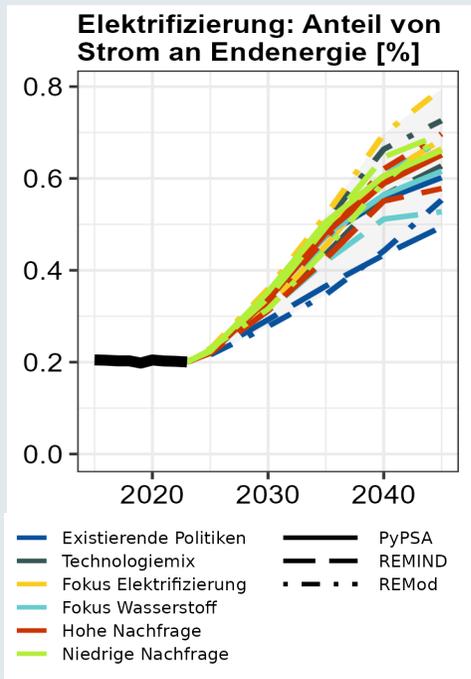
## Modellensemble



## Szenariendesign

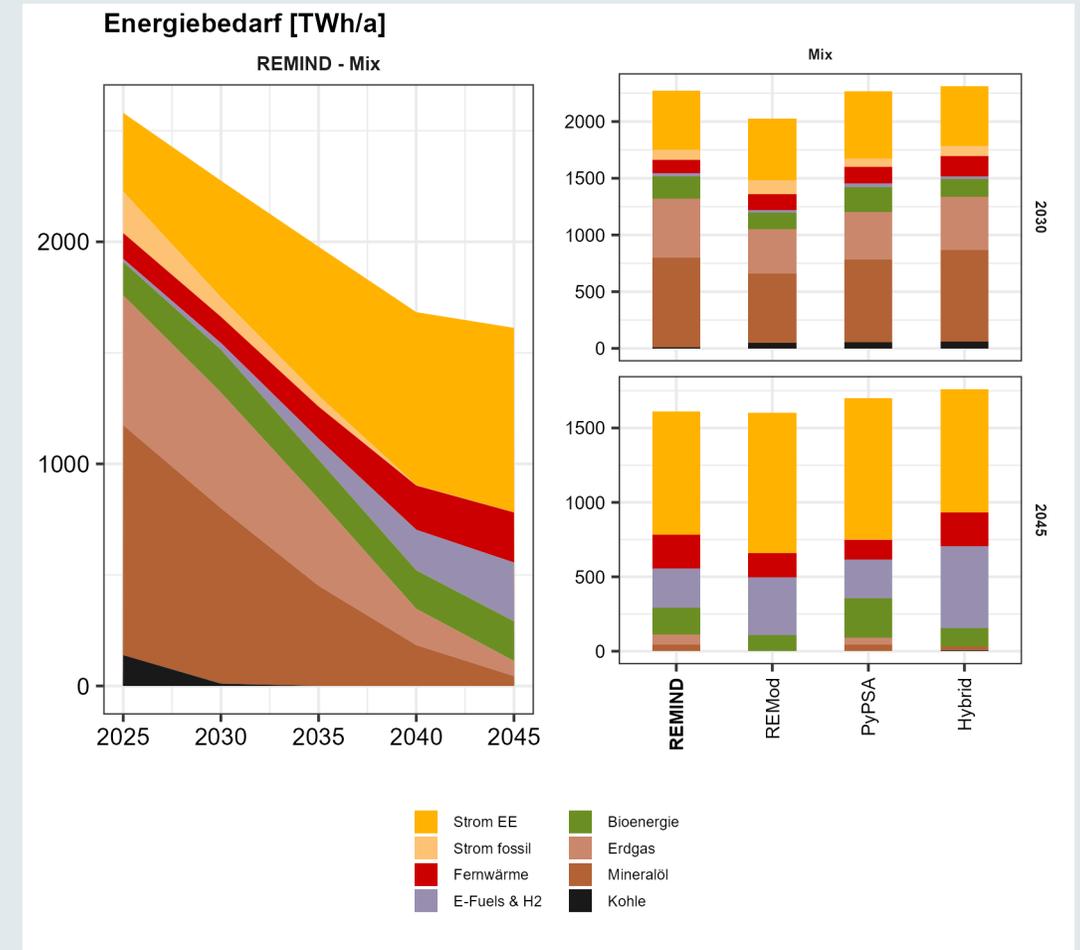
<b>Klimaneutralität bis 2045</b>	<b>0</b> <i>Existierende Politiken – ExPol</i> bis Ende 2023 implementierte Maßnahmen
	<b>1</b> <i>Technologiemix – Mix</i> breites Portfolio an Technologien und Energieträgern
	<b>2</b> <i>Fokus Elektrifizierung – Elek</i> Priorisierung von direkter Elektrifizierung
	<b>3</b> <i>Fokus Wasserstoff – H2:</i> Stärkere Nutzung von Wasserstoff und H2-Derivate
	<b>4</b> <i>Niedrige Nachfrage – NFniedrighoch:</i> Geringere Nachfrage und schnellerer nachfrageseitiger Technologiehochlauf
<b>5</b> <i>Hohe Nachfrage – NFhoch:</i> Geringere Nachfrage und träger nachfrageseitiger Technologiehochlauf	

## Modellrechnungen und Analysen



# KLIMANEUTRALITÄT UND INNOVATION FÜHREN ZU TIEFGREIFENDEM UMBAU DES ENERGIESYSTEMS

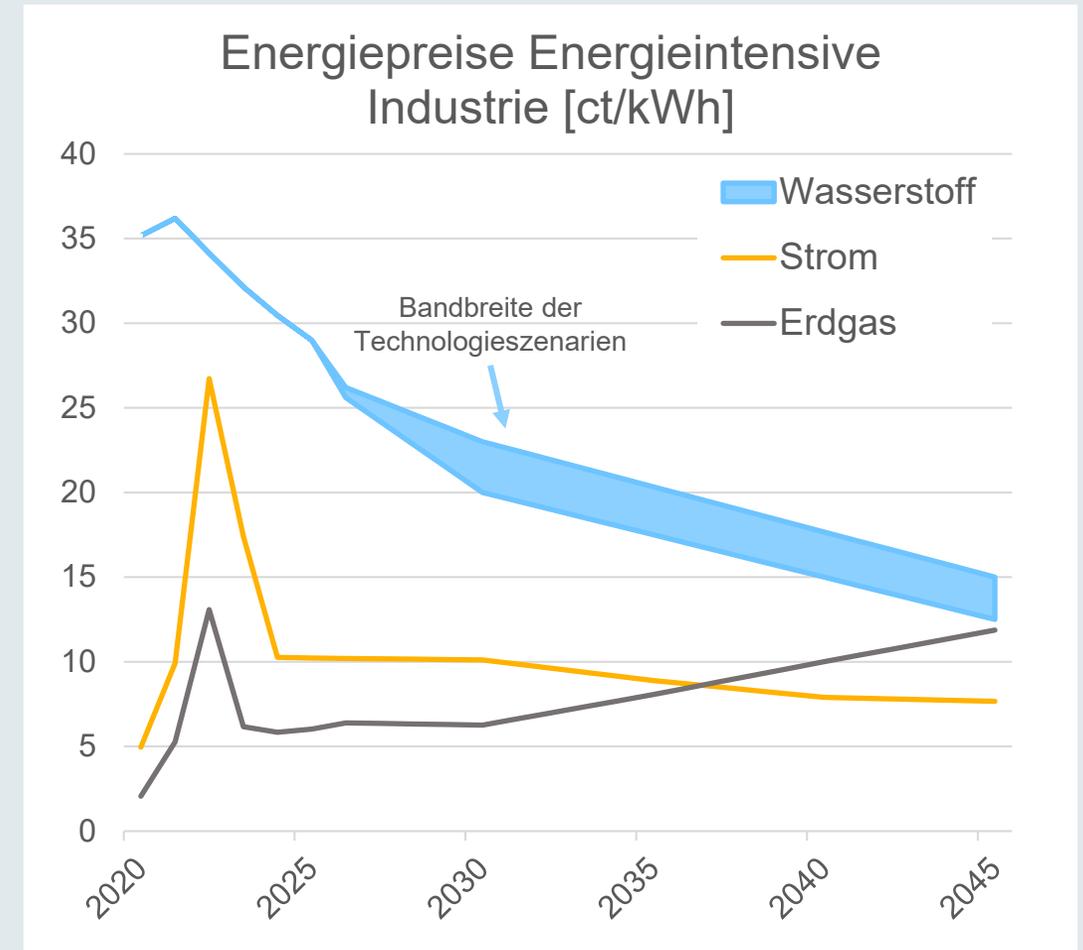
- › **Stromdekarbonisierung:** CO<sub>2</sub>-Intensität von Strom sinkt bereits 2030 auf unter 90 g/kWh
- › **Elektrifizierung:** Anteil von Strom am Energiebedarf steigt auf 47-59 %, bzw. 53-80 % der Endenergie excl. Flug-/Schiffsverkehr und stoffliche Nutzung
- › **Nicht-elektrische Energiebedarfe** müssen zunehmend aus **Biomasse, Wasserstoff** und H<sub>2</sub>-basierten **E-Fuels** gedeckt werden
- › **Ausstieg aus den Fossilen:** Nutzung fossiler Energie wird auf unter 5 % des aktuellen Niveaus gesenkt.



GEFÖRDERT VOM

# NICHT-ELEKTRISCHE ENERGIETRÄGER DOMINIEREN ENERGIEKOSTEN

- › **Fossile Energie** verteuert sich wegen CO<sub>2</sub>-Preis
- › **Strompreis** entkoppelt sich vom CO<sub>2</sub>-Preis
- › **Grüner Wasserstoff** bleibt lange **knapp und teuer**



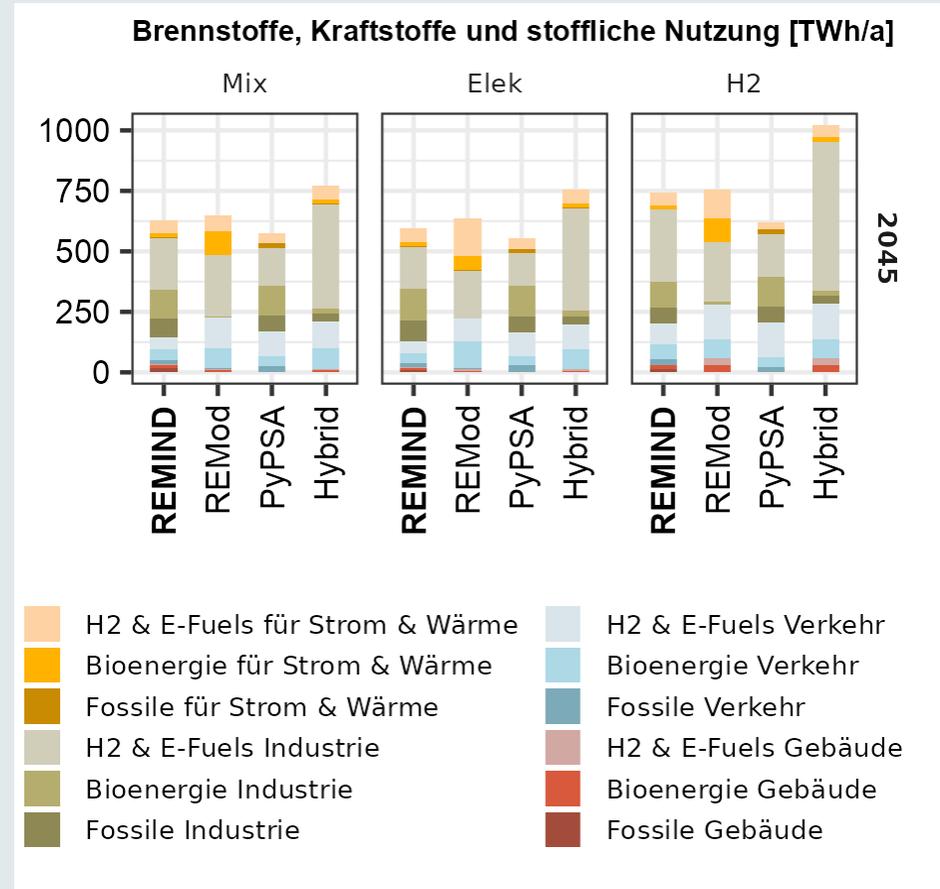
Quelle: Ariadne-Projektionen

GEFÖRDERT VOM



# NACHFRAGE NACH STOFFLICHEN ENERGIETRÄGERN (“MOLEKÜLE”) DOMINIERT KLIMASCHUTZHERAUSFORDERUNG

- › **Grundstoffindustrie** (insb. Chemie, Stahlindustrie) dominiert
- › **Flug- und Schiffsverkehr**
- › Bedarfe für **Stromerzeugung, Gebäude** relativ klein
- › **Nachhaltige Bioenergie** trägt ca. 200 TWh bei, weitere Bedarfe müssen vor allem durch **Wasserstoff und E-Fuels** gedeckt werden.



Zum Vergleich:  
ca. 2800 TWh fossile Energie in 2019

# INVESTITIONEN UND KOSTEN

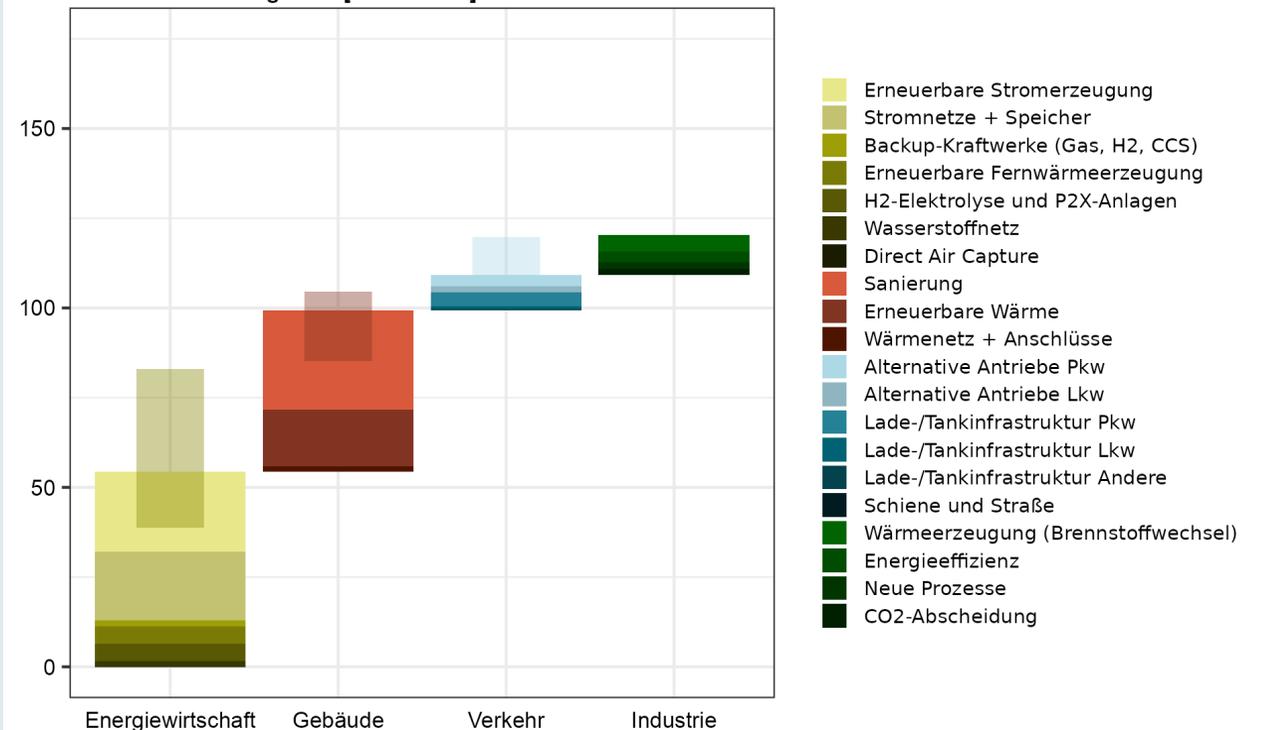


# JÄHRLICHE ENERGIEWENDEBEZOGENE INVESTITIONEN VON 116-131 MRD EUR

- › **Energiewirtschaft:** Vor allem Zubau Erneuerbarer Stromerzeugung (Wind und Solar), Netzausbau; kleinere Anteile Fernwärme, H<sub>2</sub>-Netz und Elektrolyse
- › **Gebäude:** Energetische Sanierung von Gebäuden, Installation von Wärmepumpen
- › **Verkehr:** Marktvolumen für E-Fahrzeuge erreicht 80 Mrd EUR in 2030; Differenzinvestitionen für E-Fahrzeuge sind klein
- › **Industrie:** Investitionen von 11 Mrd EUR pro Jahr für Brennstoffwechsel, Energieeffizienz, neue Prozesse und CO<sub>2</sub>-Abscheidung

Jährliche Investitionen für die Energiewende im Mittel in 2025-45, Szenario *Technologiemix* [Mrd. EUR/a]

(b) Jährliche Investitionen im Mittel in 2025-2045, Szenario *Technologiemix* [Mrd. EUR/a]



GEFÖRDERT VOM

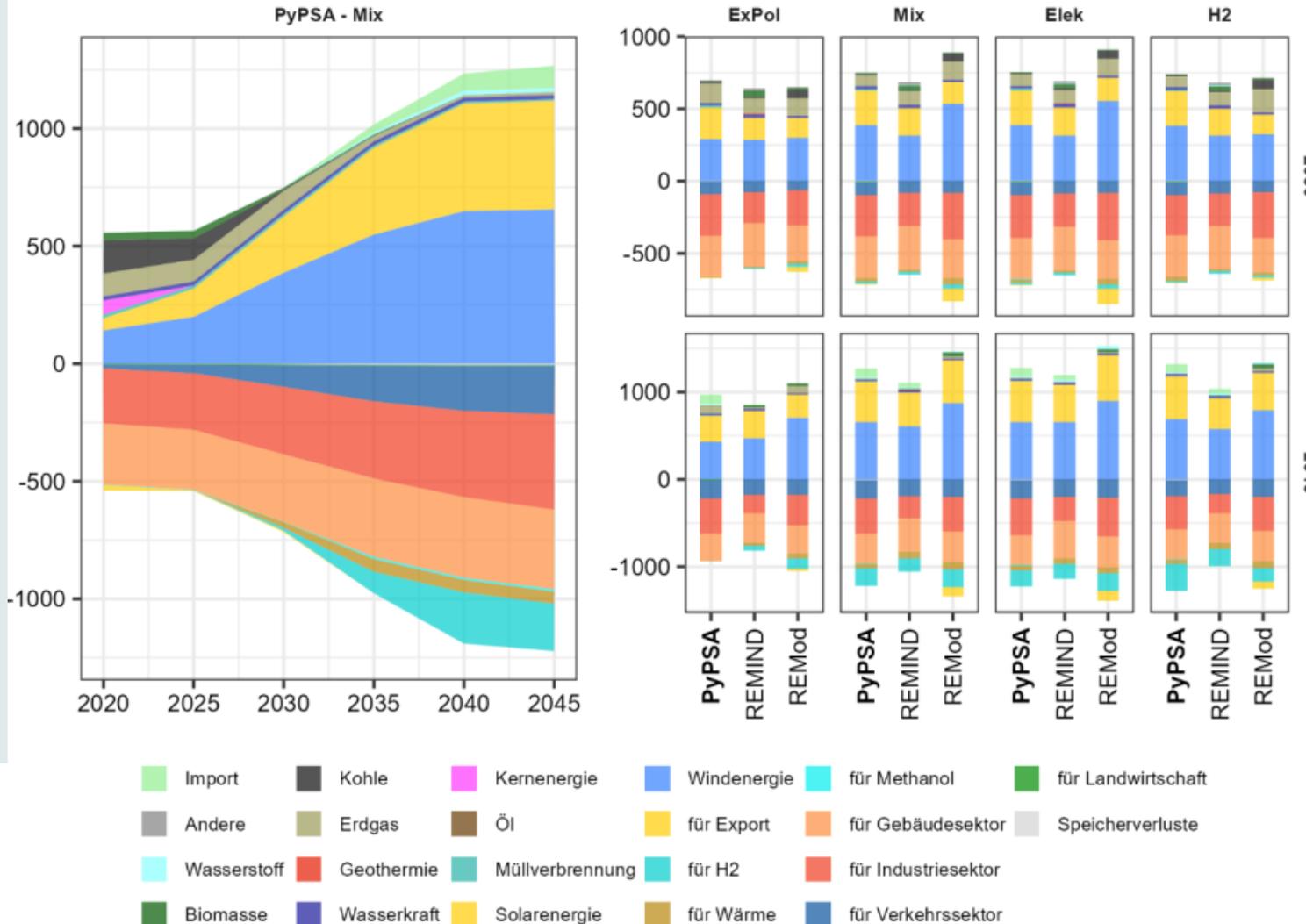
# STROMSYSTEM



GEFÖRDERT VOM

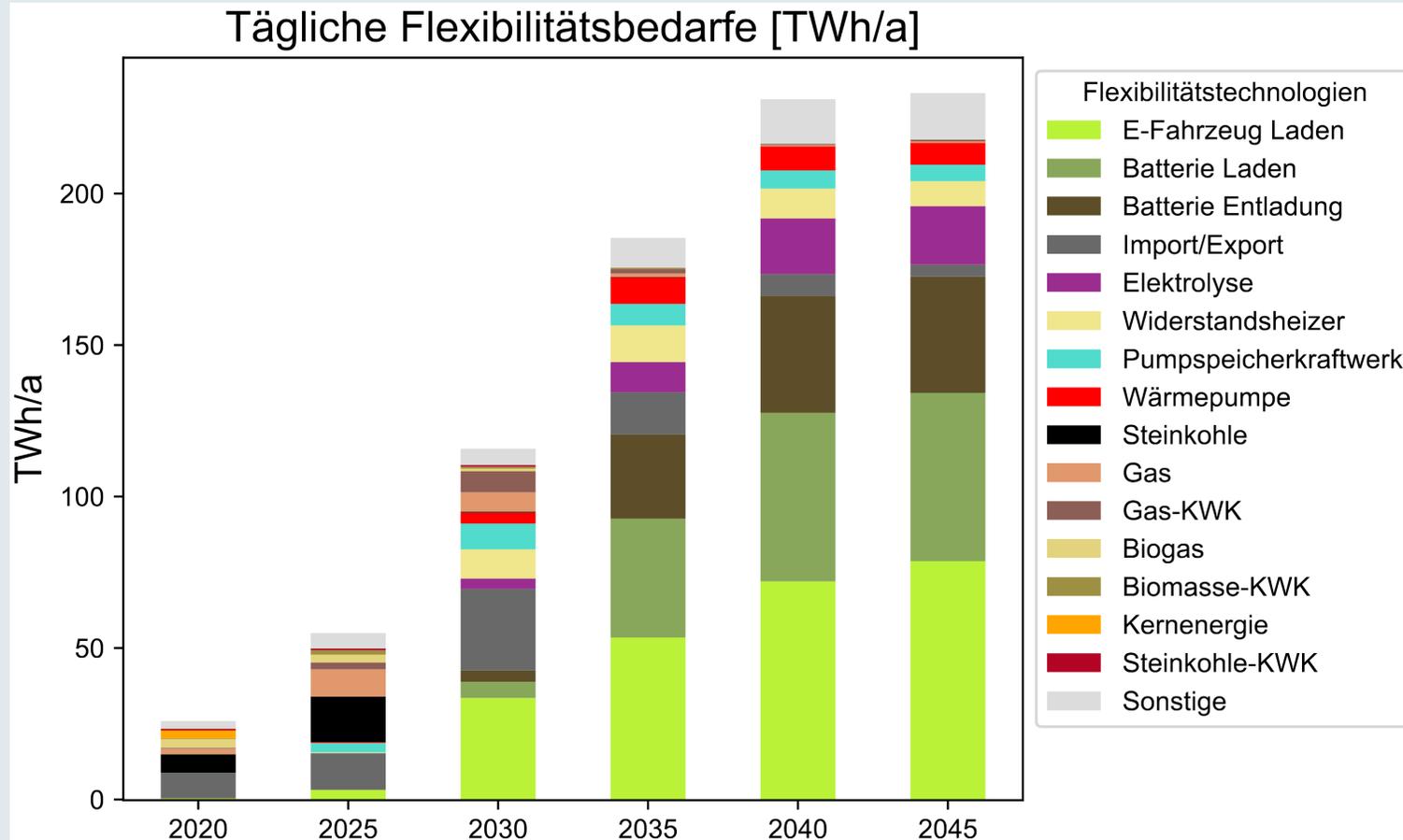
# STROMERZEUGUNG UND -NACHFRAGE

Stromerzeugung und -einsatz [TWh/a]



- **Stromnachfrage steigt** in den Kernszenarien auf 1100-1300 TWh/a im Jahr 2045 aufgrund der **Elektrifizierung und Elektrolyse**
- **80% EE-Ziel für 2030** wird in PyPSA-DE und REMod erreicht
- Der Anteil von Wind und Solar am Strommix steigt **bis 2035 auf 84-91%**
- Der **Restbedarf** wird durch eine Mischung aus Wasserstoff, Erdgas, Wasserkraft, Bioenergie und Importe gedeckt
- **Kapazitäten** in PyPSA Mix im Jahr 2045: 64 GW Offshore-Wind, 180 GW Onshore, 468 GW PV, 68 GW Wasserstoff-Kraftwerke, 19 GW verbleibende Gaskraftwerke, 436 GWh Batterien

# FLEXIBILITÄTSBEDARF VERVIELFACHT SICH BIS 2045

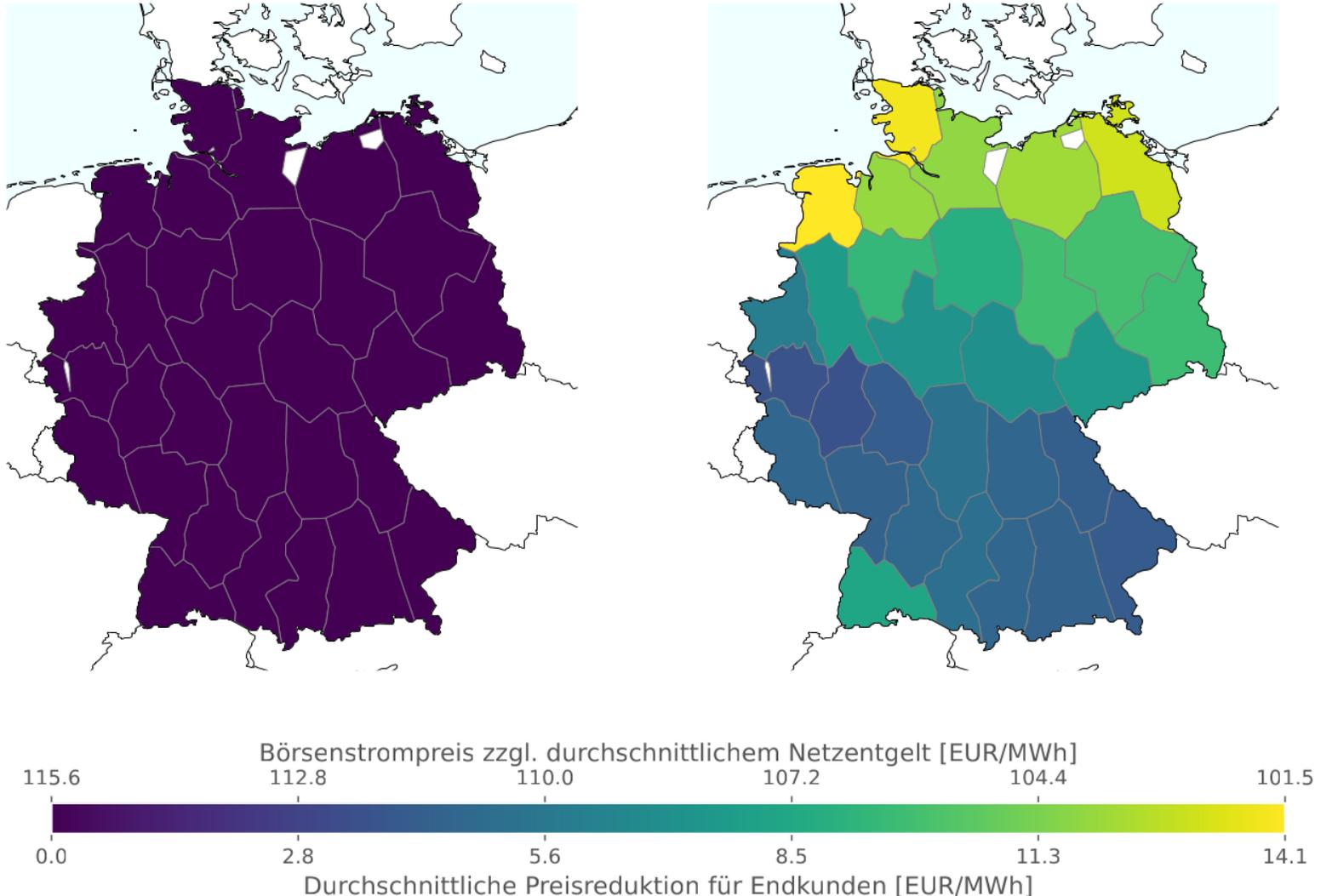


- **Vierfacher Flexibilitätsbedarf** bis 2045 für die Variabilität von Angebot und Nachfrage
- **Technologische Lösungen:** Flexibles Laden von E-Fahrzeugen, Batterien, Elektrolyseure & Wärmepumpen
- **Zeitvariable Stromtarife nötig:** Flexible Nutzung setzt dynamische Strompreise voraus
- **Vorteile für Haushalte:** Flexibles Verhalten senkt Haushaltskosten & stabilisiert das Stromsystem

GEFÖRDERT VOM

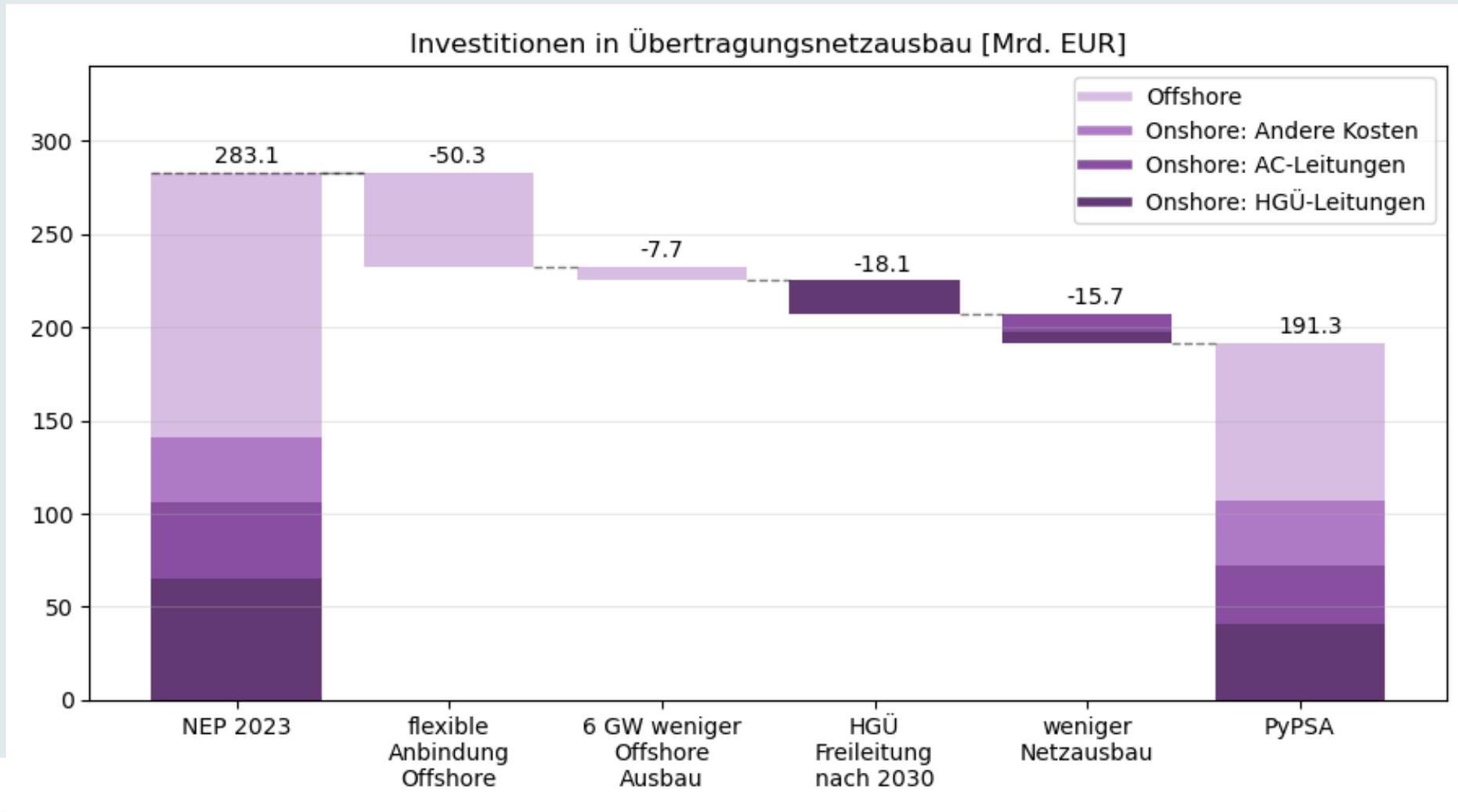
# REGIONALE STROMPREISE SENKEN KOSTEN BUNDESWEIT

Durchschnittspreis, NEP Ausbau [EUR/MWh] Regionale Preise, PyPSA-DE Ausbau [EUR/MWh]



- **Vergleich: Einheitsgebotszone** mit NEP-basierten Netzentgelten versus **regionale Preise** mit Netzentgelten vom PyPSA-Netzausbau
- **Integrierte Planung** mit regionalen Preisen führt zu weniger Netzausbau und Redispatch, höhere Engpassrente => **Netzentgelte sinken im Schnitt um 7,5 EUR/MWh**
- Wegen niedrigerer Netzentgelte **sinken die Endkundenpreise in allen Regionen Deutschlands**, Bandbreite der Reduktion: 3,5 - 14,1 EUR/MWh

# INTEGRIERTE PLANUNG SPART NETZKOSTEN



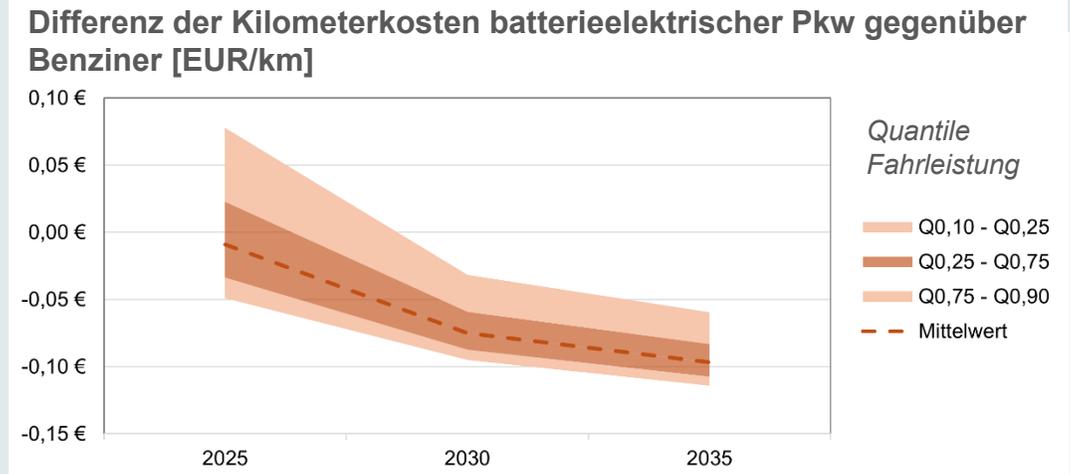
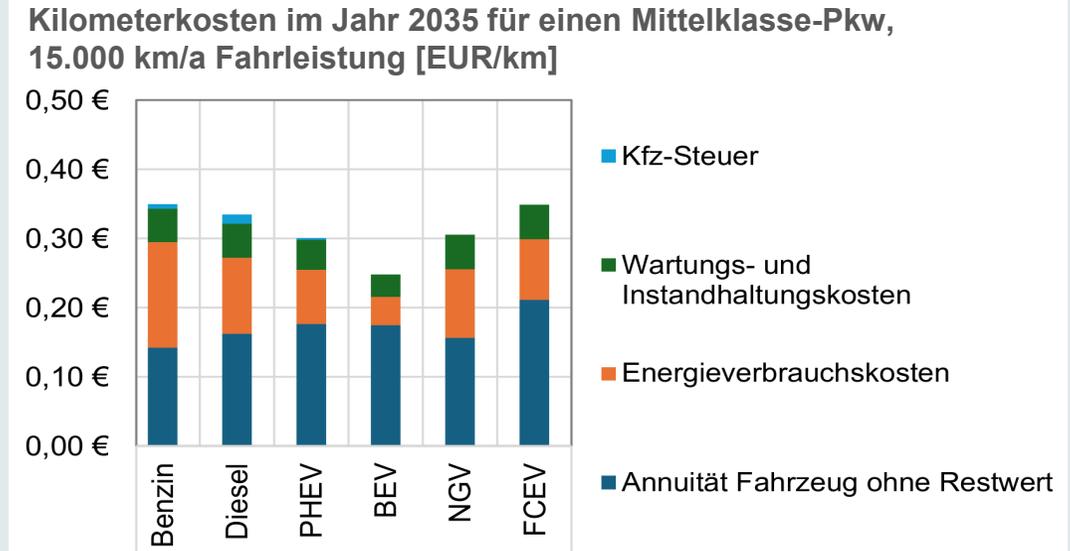
# NACHFRAGESEKTOREN



GEFÖRDERT VOM

# SEKTORALE KLIMASCHUTZKOSTEN: VERKEHR

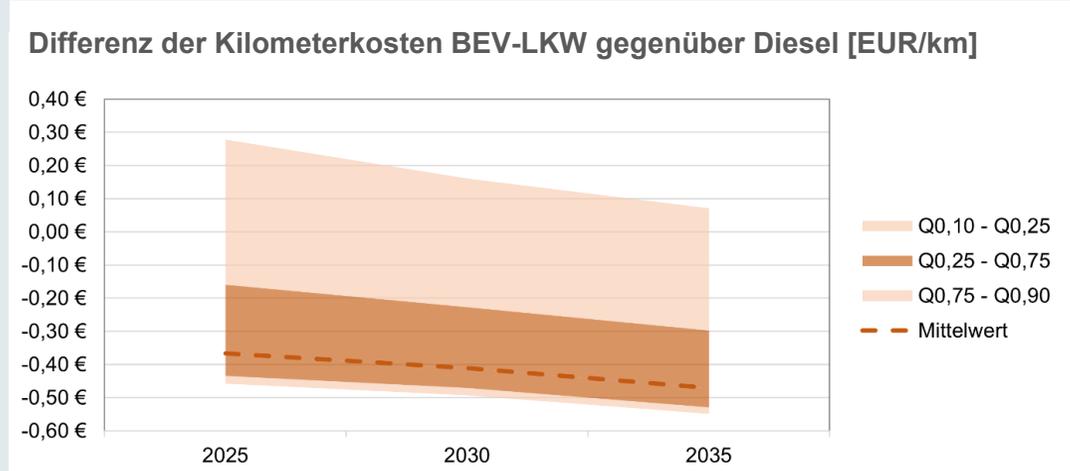
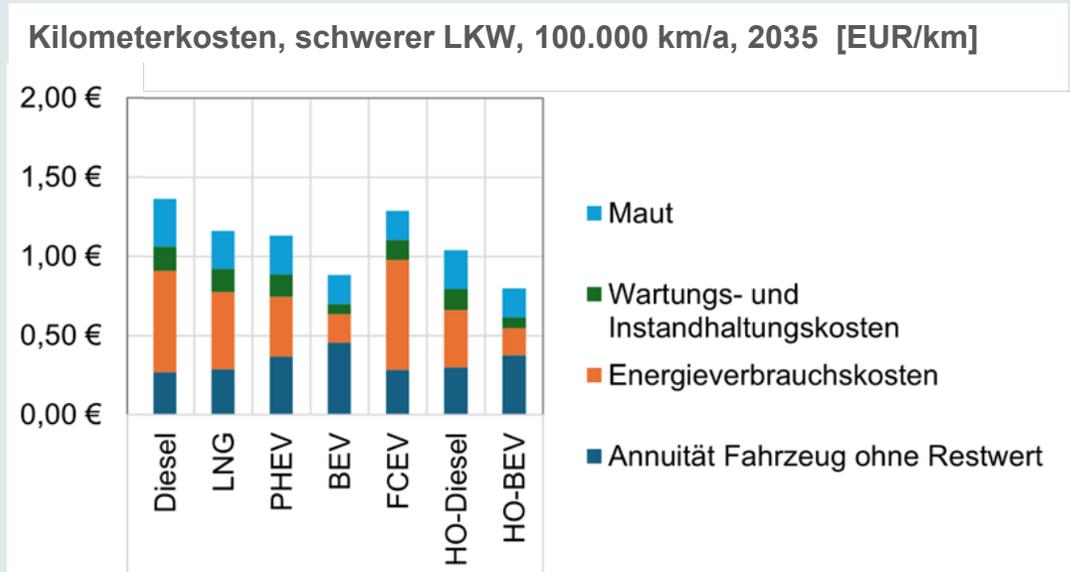
- › Spätestens ab 2030 sind **batterieelektrische Pkw** in Bezug auf die **Kilometerkosten** billiger als Verbrenner



Quelle: ALADIN-Modell

# SEKTORALE KLIMASCHUTZKOSTEN: VERKEHR

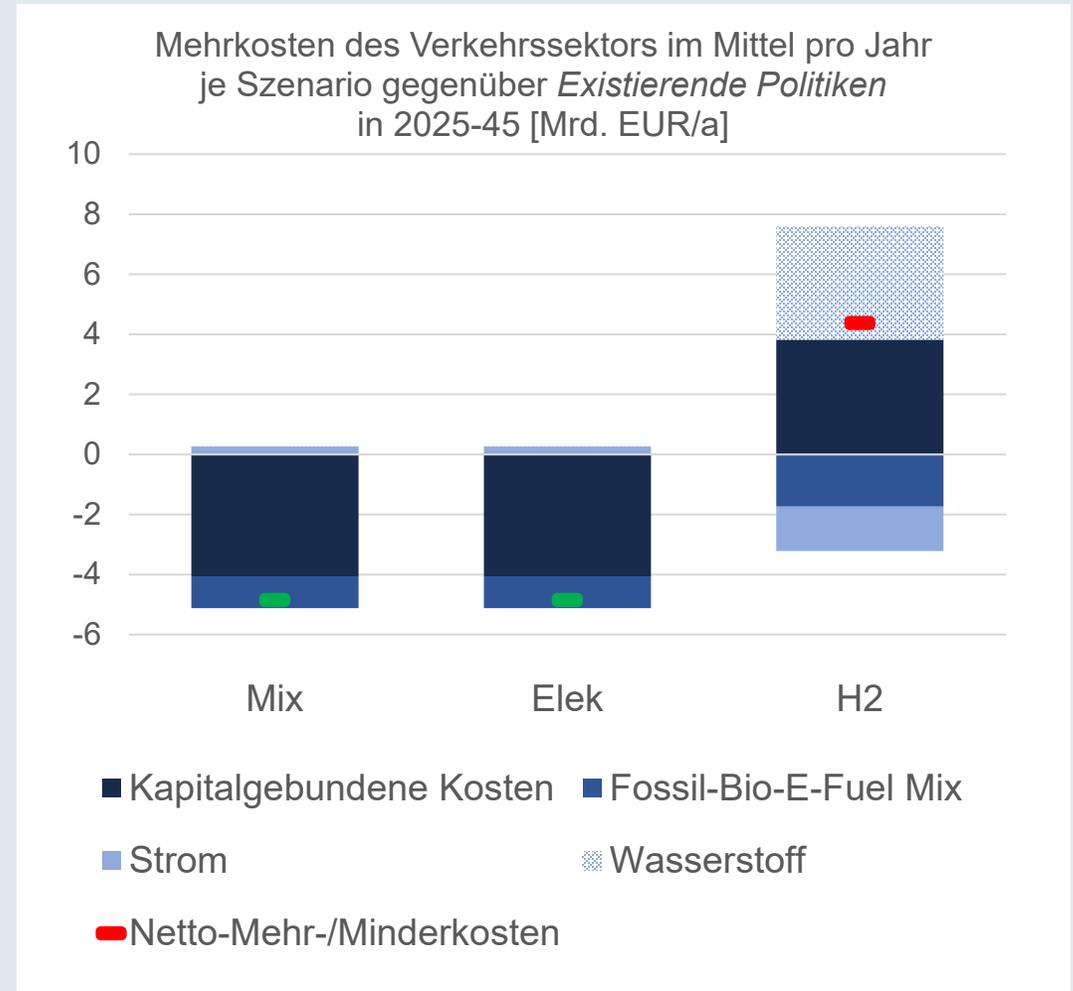
- › Spätestens ab 2030 sind **batterieelektrische Pkw** in Bezug auf die **Kilometerkosten** billiger als Verbrenner
- › Auch **batterieelektrische Lkw** auf sind in den **Kilometerkosten** günstiger als Verbrenner, weil reduzierte Energiekosten die höheren Anschaffungskosten überwiegen



Quelle: ALADIN-Modell

# SEKTORALE KLIMASCHUTZKOSTEN: VERKEHR

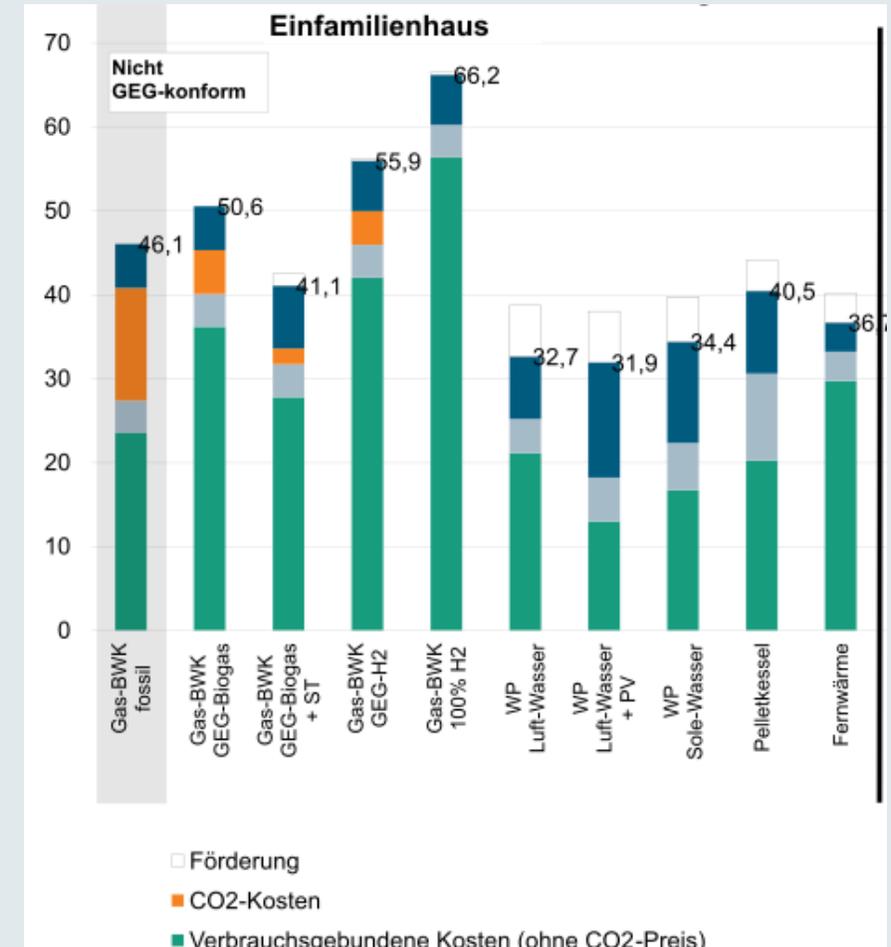
- › Spätestens ab 2030 sind **batterieelektrische Pkw** in Bezug auf die **Kilometerkosten** billiger als Verbrenner
- › Auch **batterieelektrische Lkw** in Bezug auf die **Kilometerkosten** günstiger als Verbrenner, weil reduzierte Energiekosten die höheren Anschaffungskosten überwiegen
- › **Negative Sektorale Klimaschutzkosten** für landgebundene Verkehr sind negativ im Vergleich zu *Existierende Politiken*
- › Stärkere Nutzung von H<sub>2</sub> in **Fokus Wasserstoff** führt zu **Mehrkosten**



Quelle: ALADIN-Modell

# SEKTORALE KLIMASCHUTZKOSTEN: GEBÄUDE

- › Zunehmende CO<sub>2</sub>-Bepreisung führt zu **Kostenvorteil von Wärmepumpen** gegenüber Gaskesseln in Bezug auf die Heizkosten
- › **Energetische Sanierung** als zusätzlicher Kostenfaktor hochgradig heterogen



GEFÖRDERT VOM

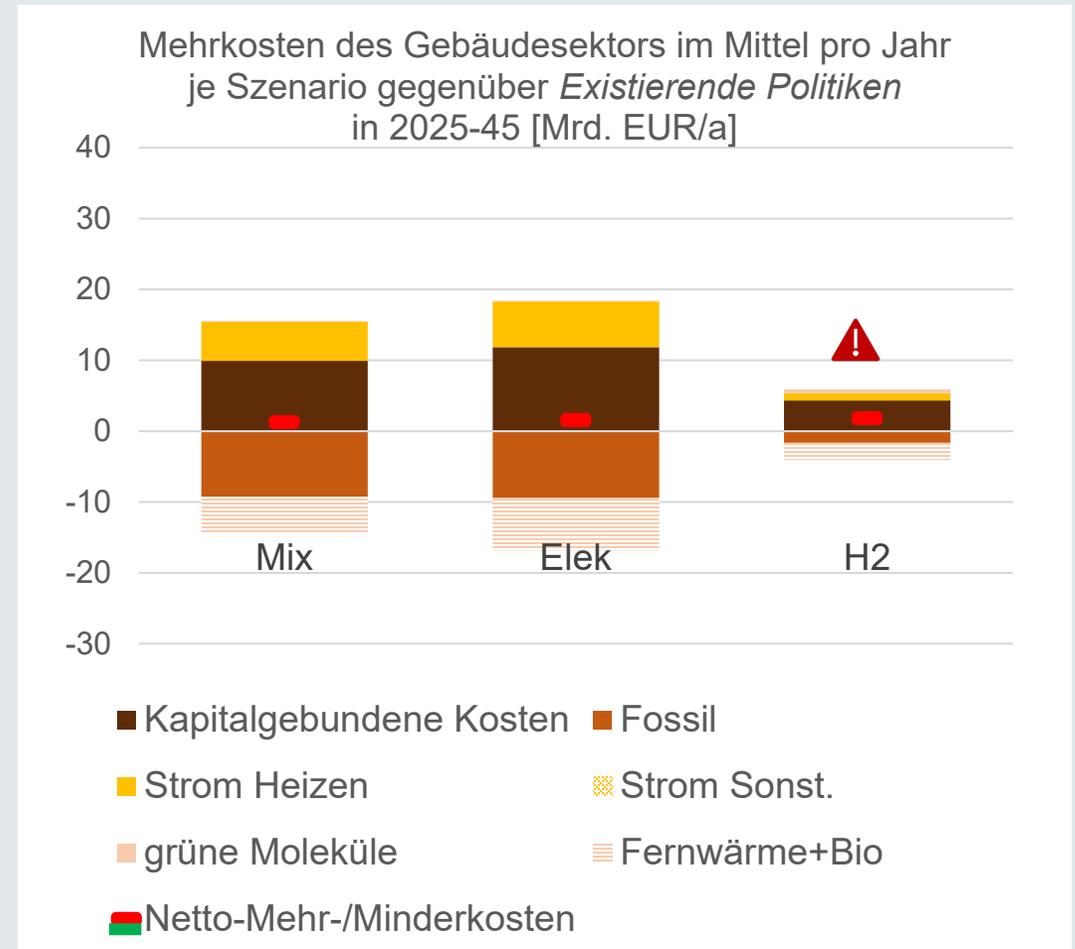


Quelle: REMod-Modell

# SEKTORALE KLIMASCHUTZKOSTEN: GEBÄUDE

- › Zunehmende CO<sub>2</sub>-Bepreisung führt zu **Kostenvorteil von Wärmepumpen** gegenüber Gaskesseln **in Bezug auf die Heizkosten**
- › **Energetische Sanierung** als zusätzlicher Kostenfaktor hochgradig heterogen

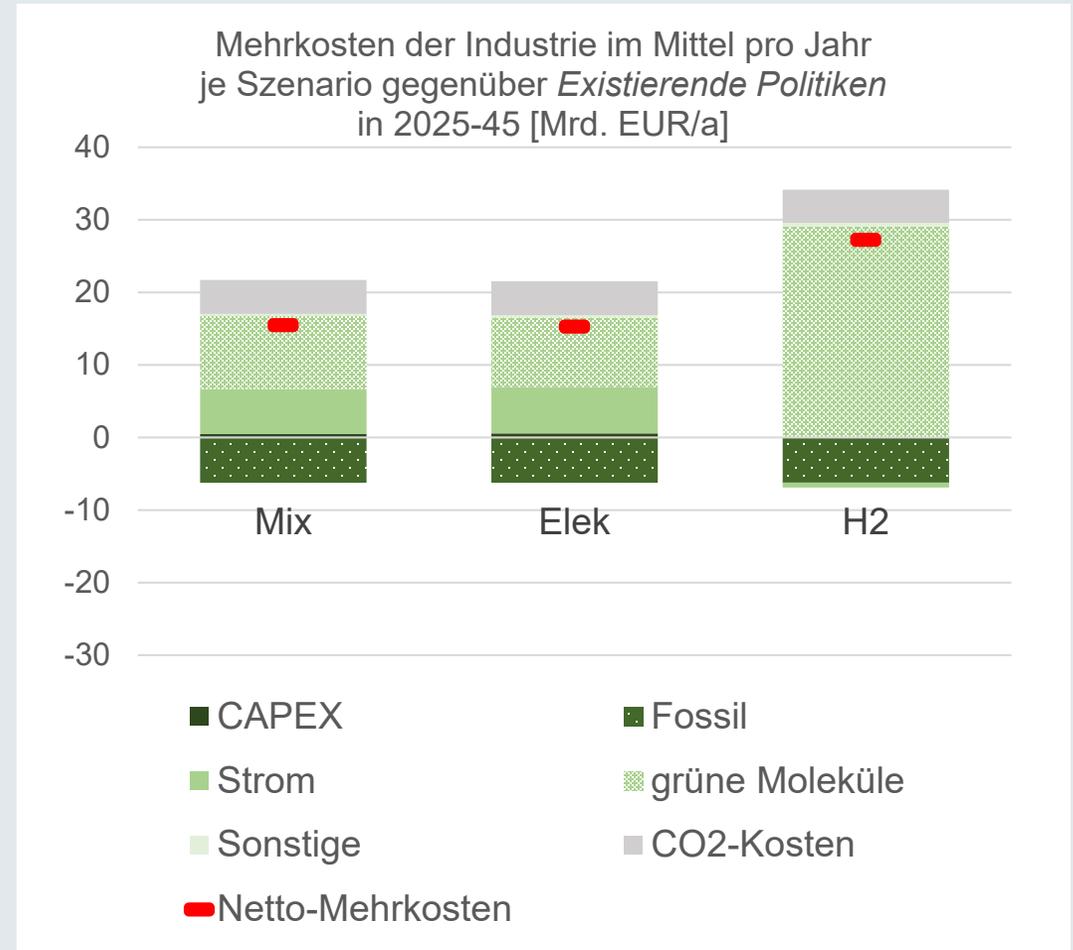
⚠ **Fokus Wasserstoff** verfehlt Sektorziel 2030 deutlich und führen zu sektoralen **Zusatzemissionen von 250 Mt CO<sub>2</sub>** in 2025-45.



Quelle: REMod-Modell

# SEKTORALE KLIMASCHUTZKOSTEN INDUSTRIE

- › **Technologiemix:** Ca.15 Mrd. EUR Mehrkosten für CO<sub>2</sub>-neutrale Energie
- › Einsparungen bei **fossiler Energie** können Mehrkosten nicht ausgleichen
- › Ein großer Teil des Energiebedarfs konzentriert sich auf die **energieintensive Grundstoffindustrie**
- › Kapitalgebundene Kosten spielen eine eher untergeordnete Rolle, **Kosten für grüne Moleküle** schlagen überproportional zu Buche
- › Höhere Mehrkosten in **Fokus Wasserstoff** mit stärkerer Nutzung von Wasserstoff und E-Fuels



Quelle: FORECAST-Modell

# GESAMTSYSTEM

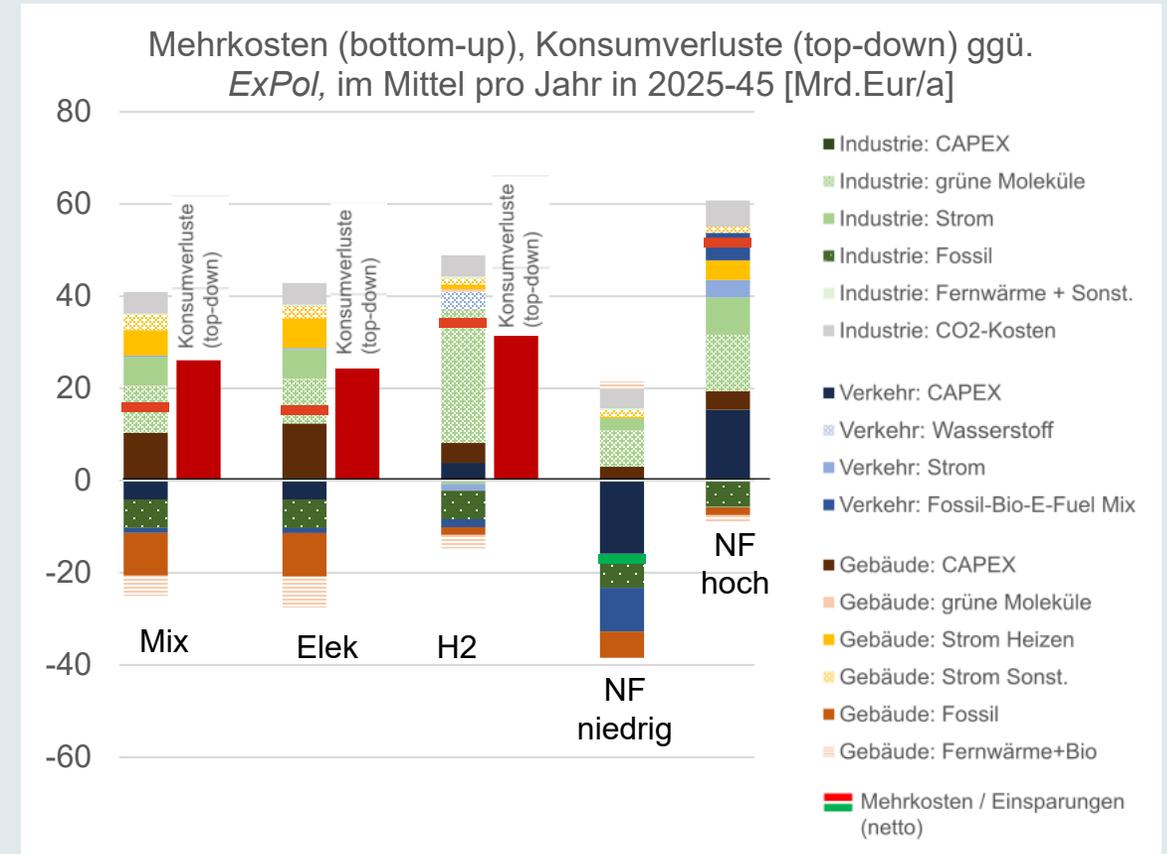


GEFÖRDERT VOM

# GESAMTKOSTEN: BOTTOM-UP UND TOP-DOWN ABSCHÄTZUNG

## Netto-Kosten sind deutlich geringer als Brutto-Investitionen

- › Zentrales Szenario *Technologiemix* führt zu **Zusatzkosten für Klimaneutralität** von ca. **16 Mrd EUR pro Jahr** (Bottom-up Abschätzung) bzw. **26 Mrd EUR pro Jahr** (Top-down-Abschätzung) gegenüber existierenden Politiken
- › **Fokus Elektrifizierung** vergleichbar **niedrige Kosten** wie *Technologiemix*
- › **Fokus Wasserstoff** führt zu deutlich **höheren Kosten**, vor allem wegen zusätzlichen Ausgaben für Energiekosten der Industrie
- › **Nachfrageseite ist wichtig**: Klimafreundlichere Energienachfrage führen zu deutlich geringeren Klimaschutzkosten.



GEFÖRDERT VOM

# GESAMTPERSPEKTIVE: FISKALISCHE BEDARFE

› Bei Fortschreibung aktueller Förderparadigmen ergibt sich ein fiskalische Bedarf von ca. **40 Mrd EUR** pro Jahr bis 2035

› **Erlöse aus Emissionshandel** in ähnlicher Größenordnung

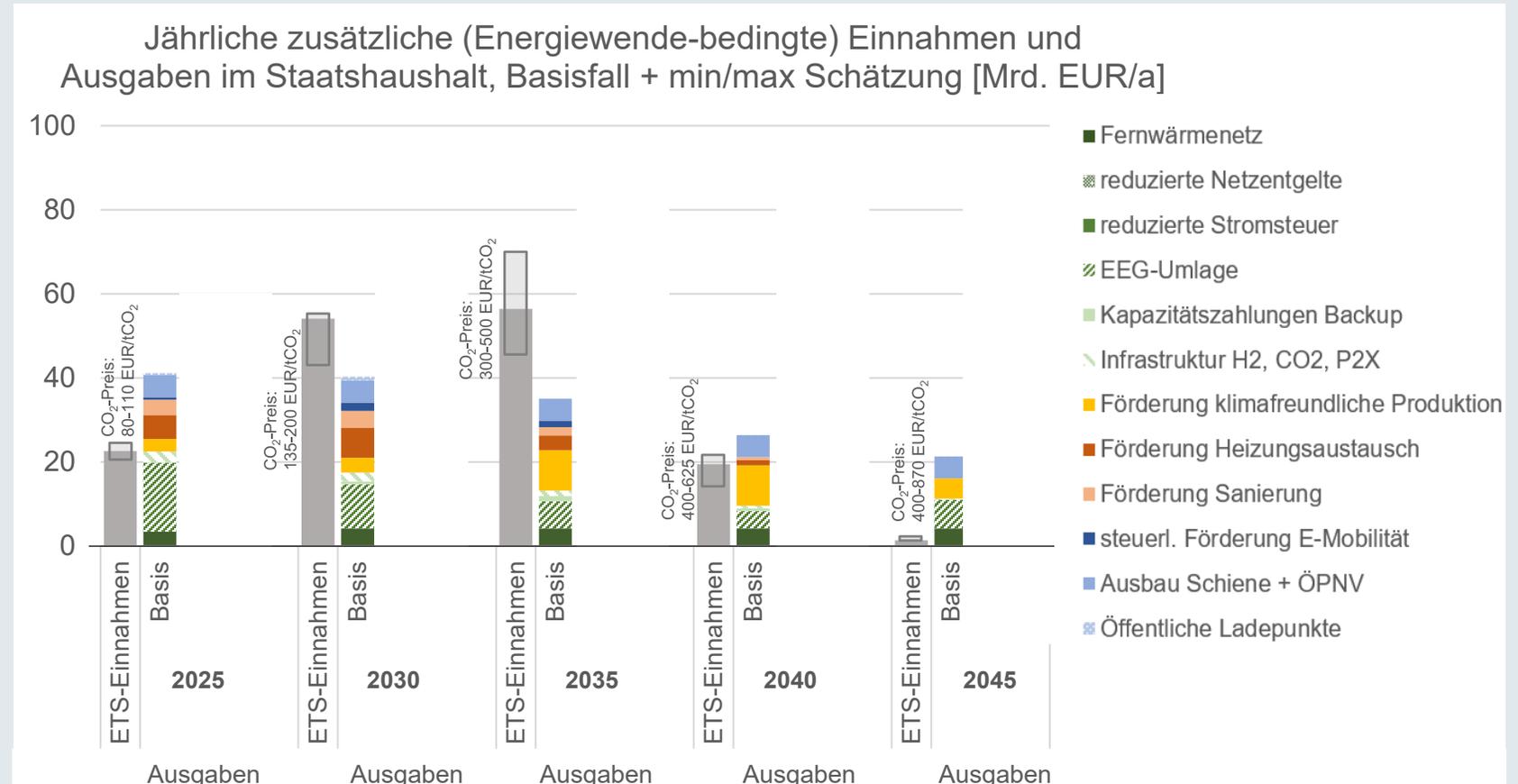
› Kosten für direkte Kompensation (**Klimageld**) sind **nicht berücksichtigt**

## Kernbereiche

› Entlastung der **Strompreise**

› **Gebäude** (Sanierung und Heizungstausch)

› Mittelfristig: **klimafreundliche industrielle Produktion**



# GESAMTPERSPEKTIVE: FISKALISCHE BEDARFE

› Bei Fortschreibung aktueller Förderparadigmen ergibt sich ein fiskalische Bedarf von ca. **40 Mrd EUR** pro Jahr bis 2035

› **Erlöse aus Emissionshandel** in ähnlicher Größenordnung

› Kosten für direkte Kompensation (**Klimageld**) sind **nicht berücksichtigt**

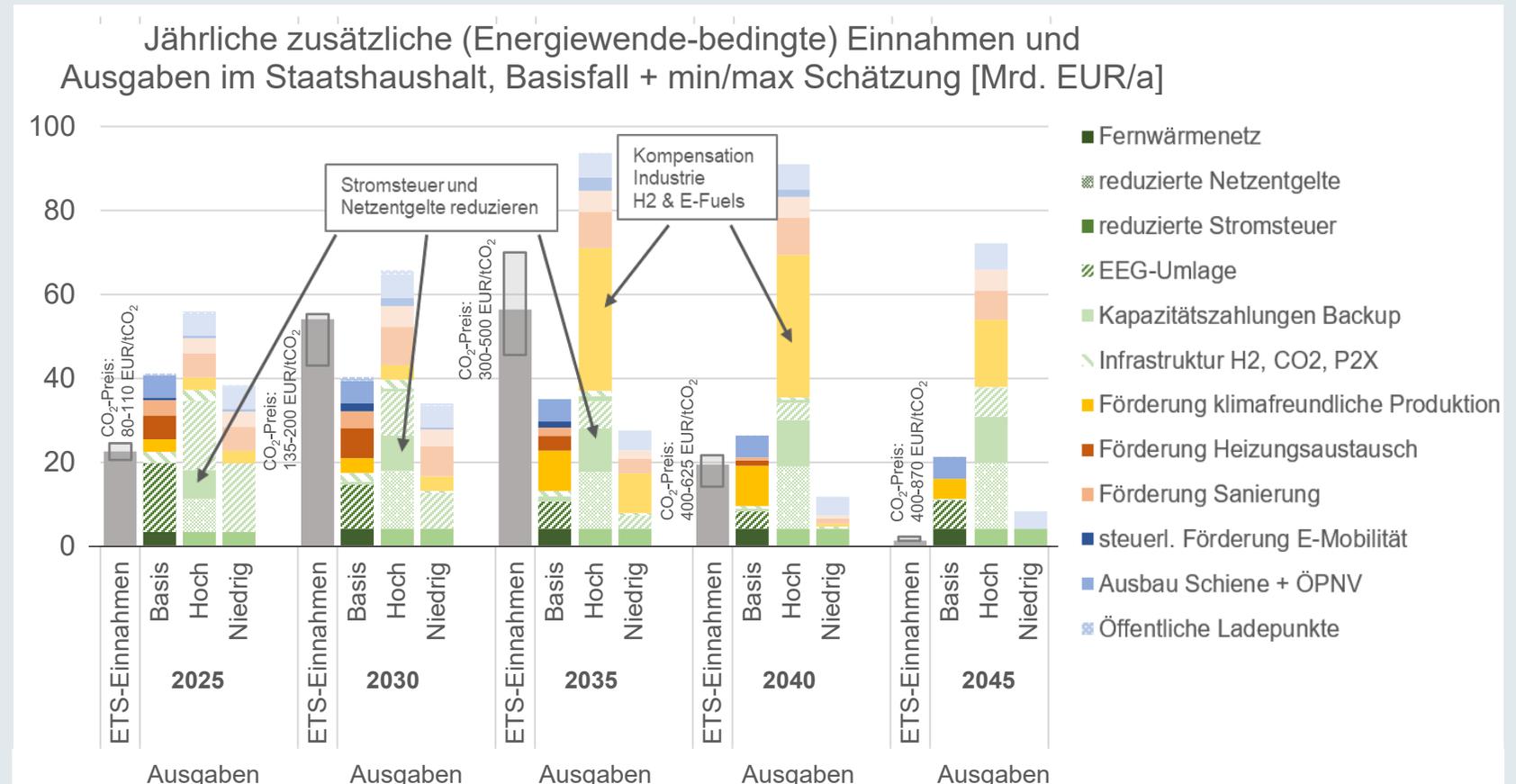
## Kernbereiche

› Entlastung der **Strompreise**

› **Neue Infrastrukturen**

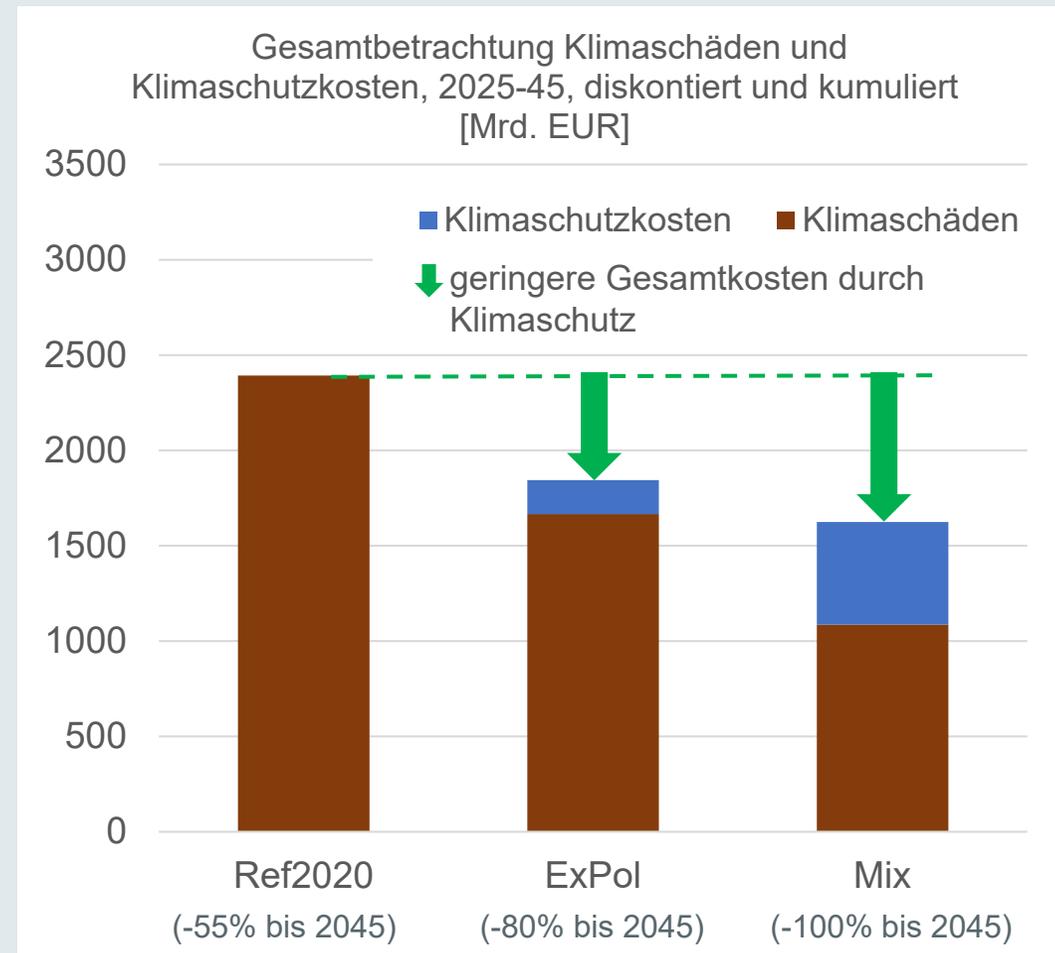
› **Gebäude** (Sanierung und Heizungstausch)

› Mittelfristig: **klimafreundliche industrielle Produktion**



# FAZIT

- › Erneuerbarer Strom aus PV und Wind, **Elektrifizierung, Flexibilisierung, Sektorenkopplung** sind Schlüssel für eine kosteneffizient Transformation zur Klimaneutralität
- › Konsequenter **Paradigmenwechsel** in Marktdesign und Politik: **Knappheiten müssen explizit gemacht** werden durch **zeitlich variable und regionale Preise**
- › Energiewende induziert **Investitionen von 116 Mrd € jährlich**, fördert **Innovation in grünen Zukunftsmärkten** wie E-Mobilität, Wärmepumpen, Erneuerbare Stromzeugung, Wasserstofftechnologien, Steuerungstechnik u.v.m.
- › Klimaschutzkosten können durch **fokussierten Einsatz von Wasserstoff und E-Fuels** begrenzt werden
- › **Nutzen durch reduzierte Klimaschäden** übersteigt Kosten des Klimaschutzes deutlich



Annahme: Klimaschadenskosten von 300 €/tCO<sub>2</sub> auf Basis von UBA (2024)



GEFÖRDERT VOM

