

Klimaschutz, Energiesicherheit, Kosteneffizienz – Gegensätze oder vereinbar?

Prof. Dr. Tom Brown

t.brown@tu-berlin.de, Fachgebiet Digitaler Wandel in Energiesystemen, TU Berlin

Einsteinforum, Potsdam, 29. April 2026

Energie bietet uns warme Häuser, kaltes Bier, Mobilität



Heute stecken immer noch viele fossile Brennstoffe im System

Braunkohlekraftwerk



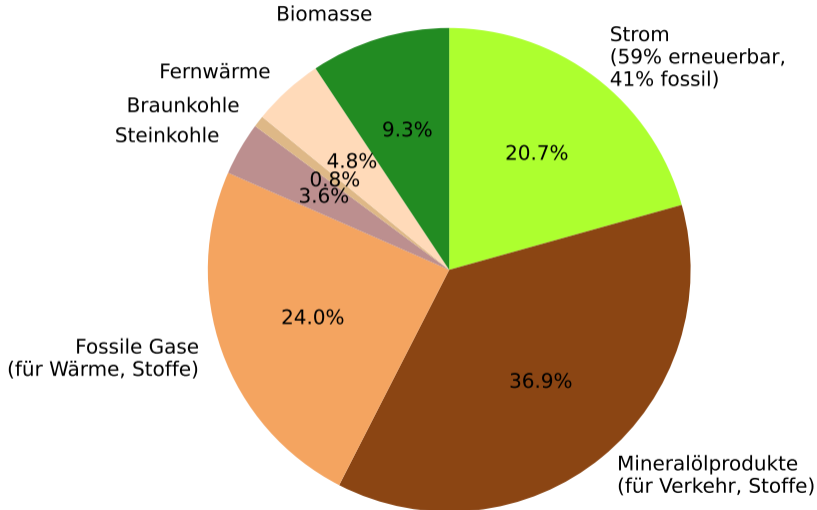
Gasheizung



Verbrennungsmotor



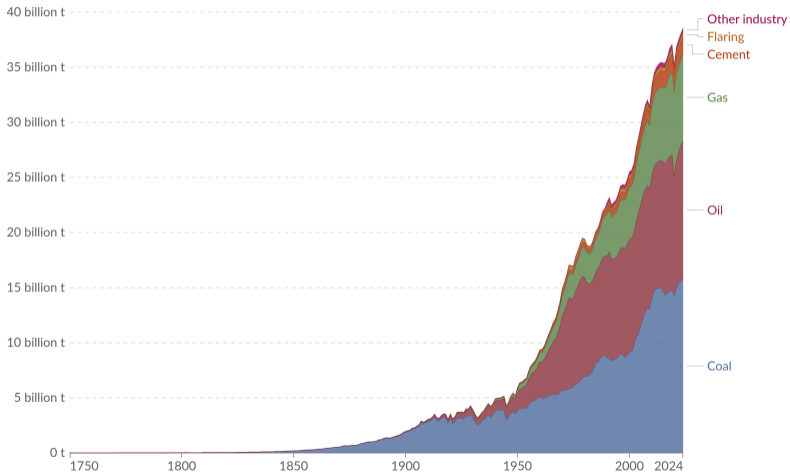
Endenergie in Deutschland 2024: mehr als Drei Viertel fossil



Problem 1: Fossile Brennstoffe führen zu Treibhausgasemissionen

CO₂ emissions by fuel or industry type, World

Our World
in Data



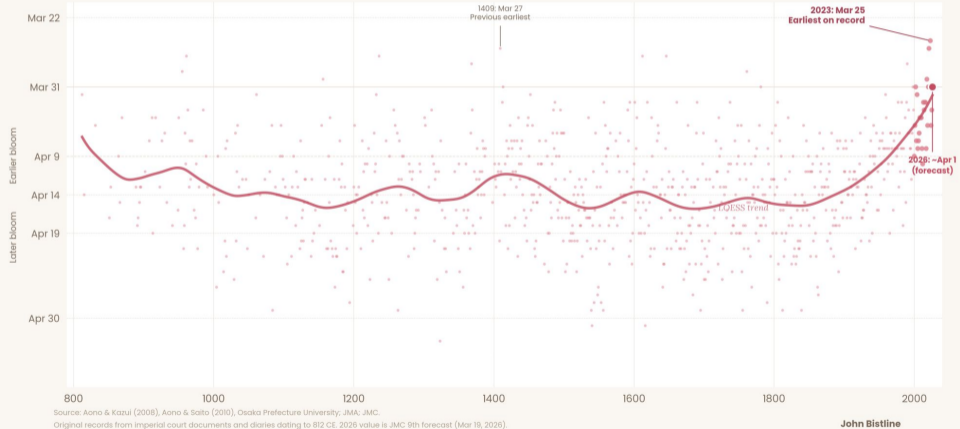
Data source: Global Carbon Budget (2025)

OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

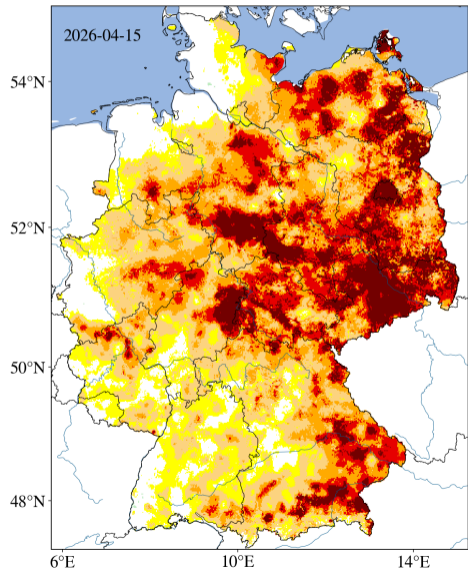
CLIMATE · 1,200 YEARS OF DATA

Kyoto's Cherry Blossoms Are Blooming Earlier Than Any Time in Recorded History

Date of peak bloom in Kyoto, Japan, 812–2026 CE. After a millennium of relative stability, bloom dates have shifted dramatically earlier since the Industrial Revolution, a proxy for warming spring temperatures.



Effekte heute: Gesamtboden im Osten seit 2018 in extremer Dürre



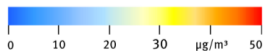
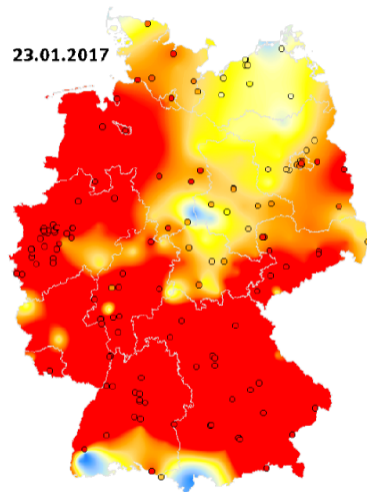
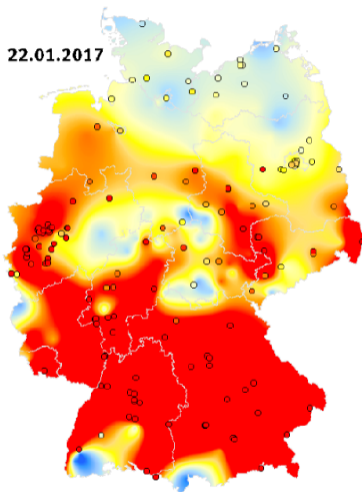
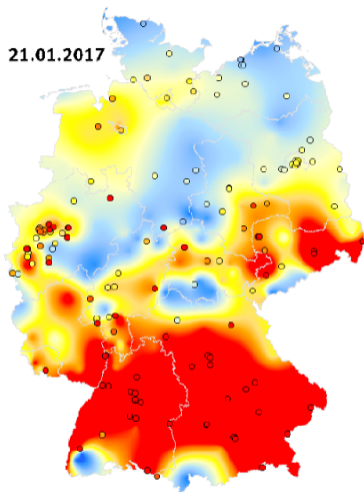
■ außergewöhnliche Dürre
■ extreme Dürre
■ schwere Dürre

■ moderate Dürre
■ ungewöhnlich trocken

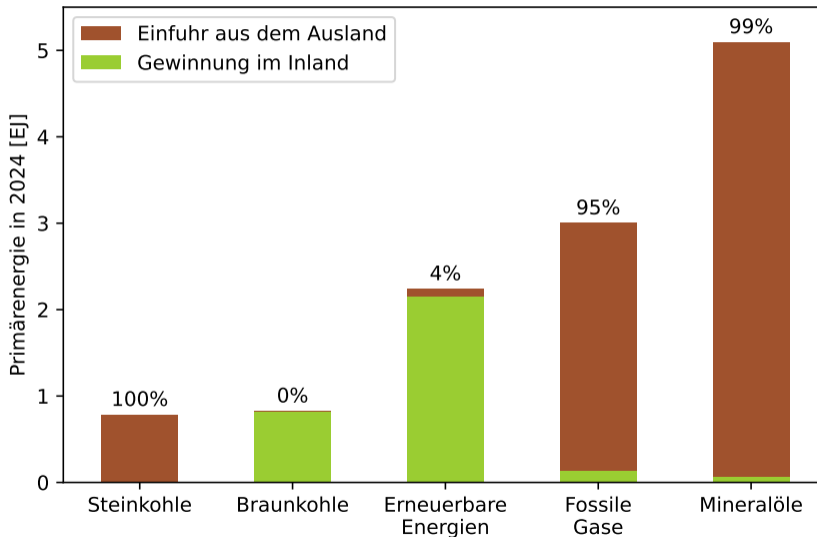
außergewöhnlich: 50-Jährlichkeit

Gesamtboden: bis ca. 1,8 m Tiefe

Problem 2: Feinstaub an windarmen Tagen im Winter (PM10)



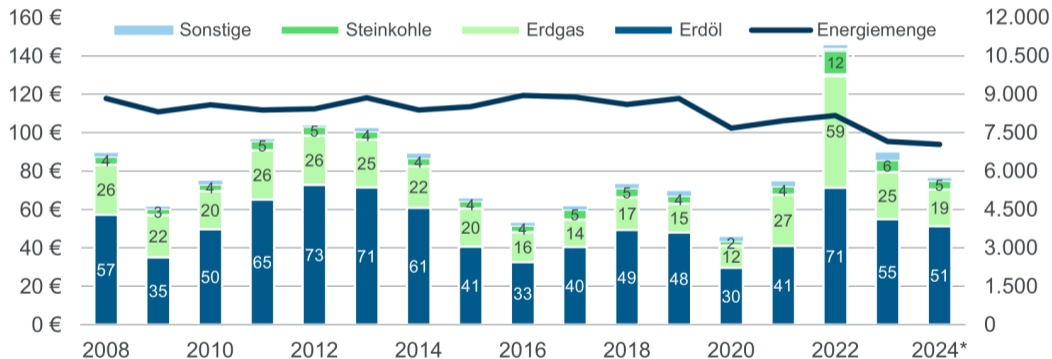
Problem 3: Energiesicherheit: Hohe Abhängigkeit von Importen



Problem 4: Ø 81 Mrd. € fließen ins Ausland für fossile Brennstoffe

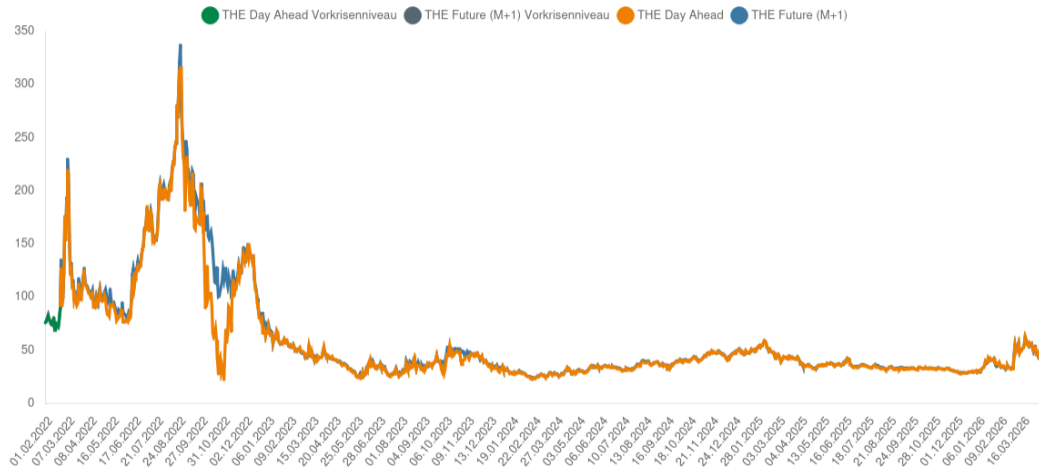
Wert und Energiemenge der Nettoimporte fossiler Brennstoffe

Linke Achse: Wert in Mrd. EUR, nominal; rechte Achse Energiemenge in PJ



Problem 5: Preisvolatilität von fossilen Brennstoffen

Gaspreise Großhandel in EUR/MWh



Quelle: EEX, Bundesnetzagentur
Letzte Aktualisierung 20.04.2026, 08:40

1. gute Nachricht: Wir haben fossilfreie Lösungen

Wind, Solar & Batterien



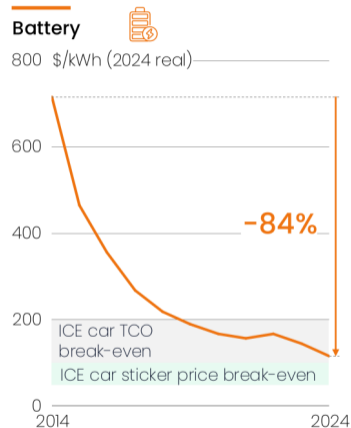
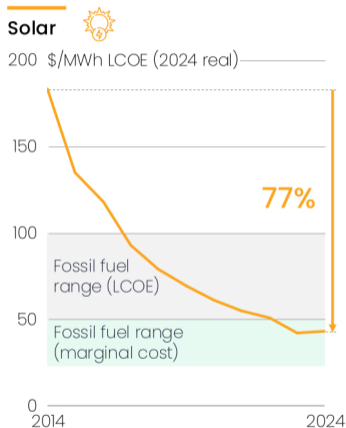
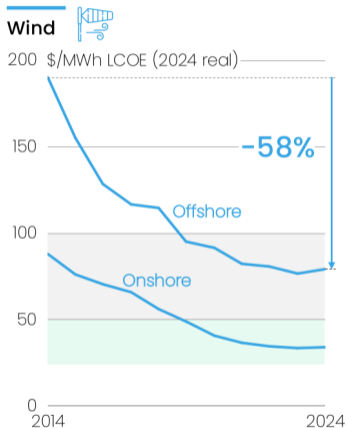
Wärmepumpe



Elektro-Auto



2. gute Nachricht: Wind, Solar & Batterien werden immer günstiger



- Das **Ariadne-Projekt** veröffentlicht 2025 einen Szenarienbericht für Deutschland, gefördert vom damaligen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
- Eine der **„Big 5“ Studien** (neben den Langfristszenarien vom BMW/K, Agora, BDI, dena)
- **Gesamtsystemmodelle:** REMIND, PyPSA, REMod
- **Szenarien:** Elektrifizierung, H₂, Mix, Niedrige/Hohe Nachfrage, Existierende Politiken



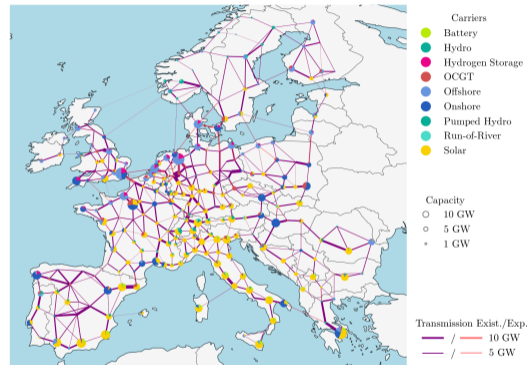
Ariadne-Report

Die Energiewende
kosteneffizient gestalten:
Szenarien zur
Klimaneutralität 2045

KOPERNIKUS
Ariadne-PROJEKTE
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM
 Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

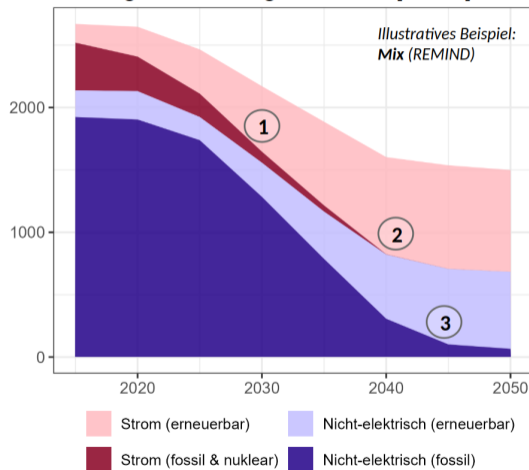
- **Open-Source-Tool** zur Modellierung von Energiesystemen mit hoher Auflösung
- Erlaubt **integrierte Modellierung** von Stromnetzen, Gasnetzen, Erzeugung, Nachfrage und Speichern
- Integrierte Netzmodellierung wird zunehmend wichtiger für die Integration **erneuerbarer Energien** sowie die **Elektrifizierung** von Verkehr, Wärme und Industrie
- **Alle Daten und Annahmen** fürs europäische Modell sind frei verfügbar



PyPSA ist auf [GitHub](#) verfügbar, wird an der TU Berlin entwickelt.

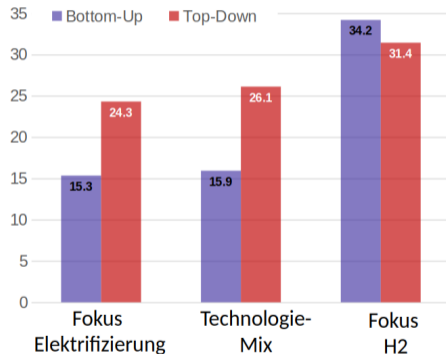
- **1. Stromerzeugung** wird bis 2030 zu >80%, bis 2040 fast vollständig CO₂-frei
- **2. Zunehmende Elektrifizierung** bisher nicht-elektrischer Verbräuche (z.B. mit e-Autos, Wärmepumpen)
- **3. Grüne Moleküle** für den Rest: Wasserstoff/E-Fuels, Biomasse und ggf. CCS für nicht-elektrifizierbare Energiebedarfe (Flug- und Schiffsverkehr, stoffliche Nutzung in der Industrie)

Endenergiebereitstellung Deutschland [TWh/a]

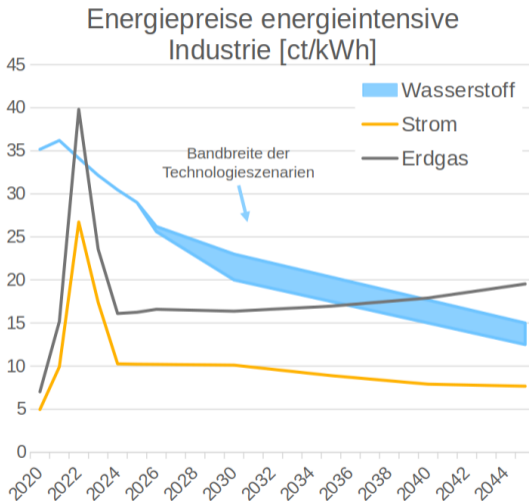


- **Mehrkosten für den Klimaschutz**
belaufen sich auf 16-26 Mrd. € pro Jahr (0,4-0,7% der aktuellen Wirtschaftsleistung)
- **Geringere Kosten** in Szenarien mit stärkerer **Elektrifizierung**, **höhere Kosten** in Szenarien mit mehr **Wasserstoff & E-Fuels**
- **Zum Vergleich:** 20-40 Mrd. €/a für einen andauernden Iran-Konflikt, 190 Mrd. €/a Klimaschäden durch deutsche Emissionen (UBA-Annahme)

Klimaschutzkosten: Netto-Kosten zur Erreichung der Klimaneutralität, gemittelt 2025-45
[Mrd € / Jahr]

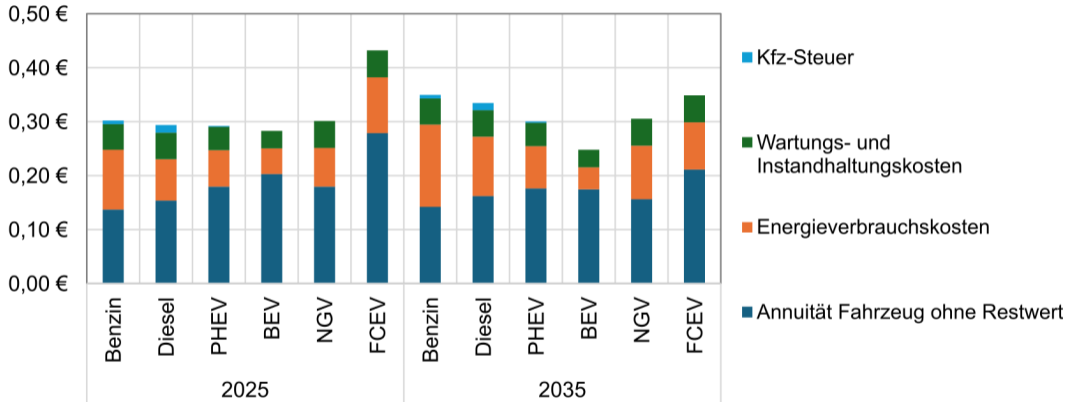


- CO₂-Bepreisung führt zu **steigenden Preisen für fossile Energie**
- **Strom entkoppelt sich vom CO₂-Preis** und sinkt leicht
- Grüner Wasserstoff bleibt **lange knapp und teuer**



Vergleich der Gesamtkosten eines Mittelklasse-Pkw 2025 und 2035

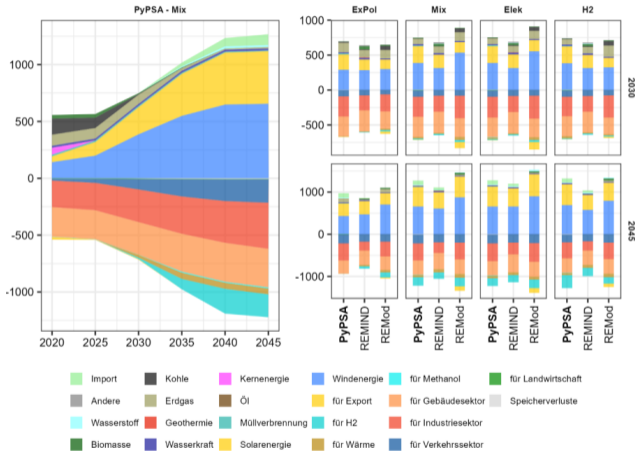
Kilometerkosten [EUR/km]



BEV: Battery Electric Vehicle, PHEV: Plug-in Hybrid EV, NGV: Natural Gas Vehicle, FCEV: Fuel Cell EV

Stromnachfrage verdoppelt sich, wird durch Wind & Solar gedeckt

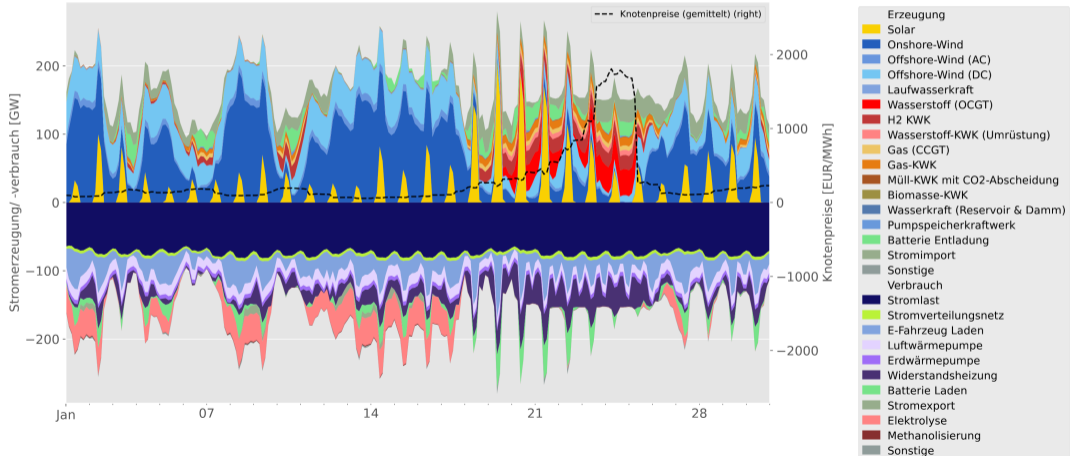
Stromerzeugung und -einsatz [TWh/a]



- **Stromnachfrage** steigt in den Kernszenarien auf 1100-1300 TWh/a im Jahr 2045 aufgrund der **Elektrifizierung**
- Anteil von **Wind und Solar** am Strommix steigt bis 2035 auf 84–91%
- **Restbedarf** durch eine Mischung aus Wasserstoff, Erdgas, Wasserkraft, Bioenergie und Importen gedeckt
- **Kapazitäten** in PyPSA Mix 2045: 64 GW Offshore, 160 GW Onshore, 468 GW PV, 68 GW H₂, 19 GW CH₄, 436 GWh Batterien

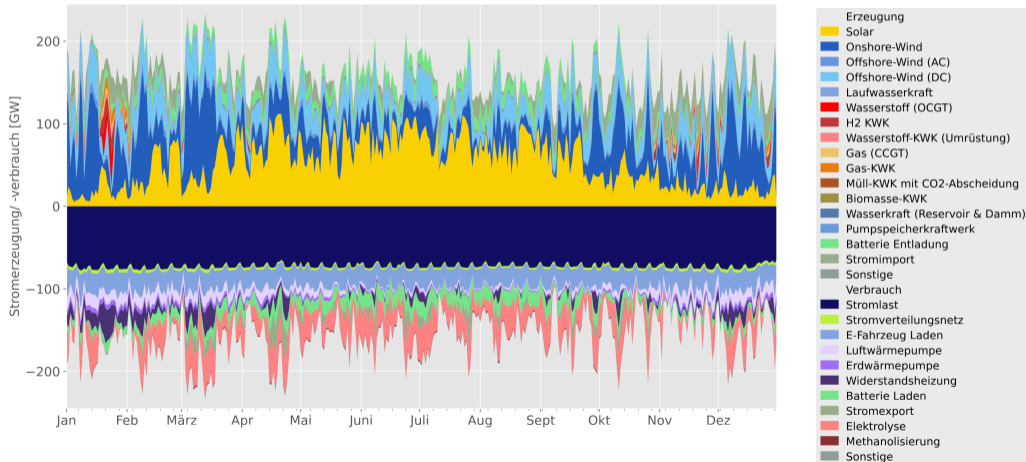
Stündliche Flexibilität: Batterien und E-Autos; **Dunkelflaute:** Wasserstoff-Backup, Importe

Strombilanz Technologiemix [GW]

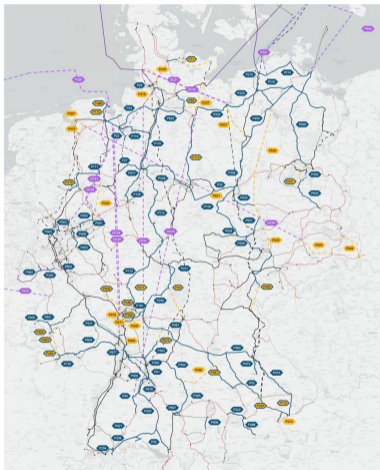


Wind und Solar **ergänzen sich saisonal**; Elektrolyse im Sommer; H2-Einsatz im Winter

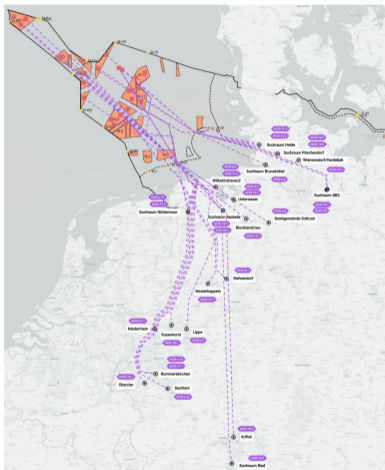
Strombilanz Technologiemiex [GW]



Onshore-Zubaunetz Szenarien A/B/C 2027, A/B/C 2045, nur Leitungsbauprojekte*

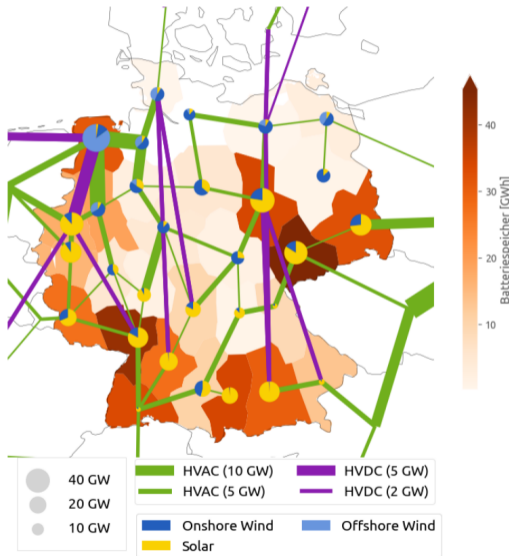


Maßnahmen des Offshore-Zubaunetzes der Nordsee in den Szenarien A/B/C 2045

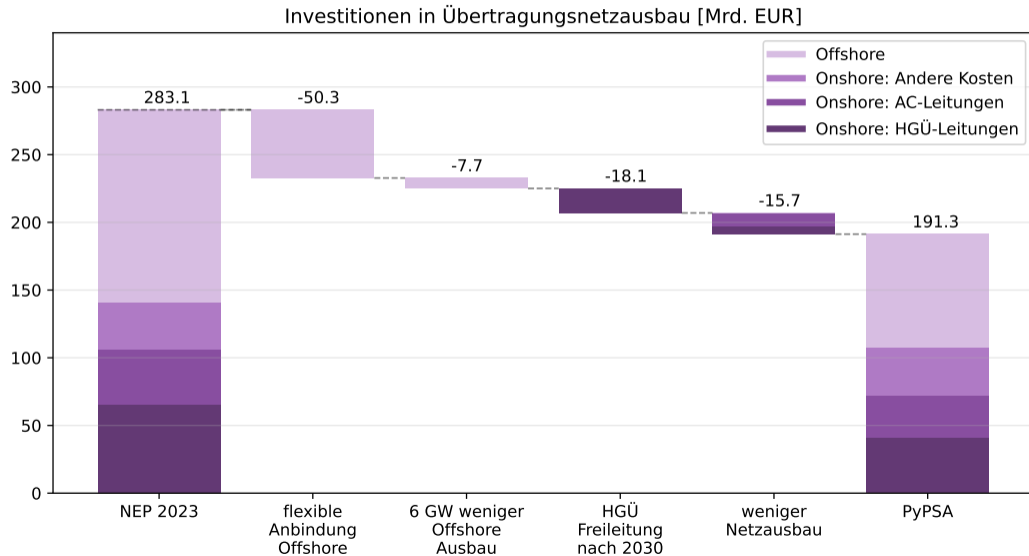


Ausbaukosten 2023 von rund 300 Mrd. € aufgrund von

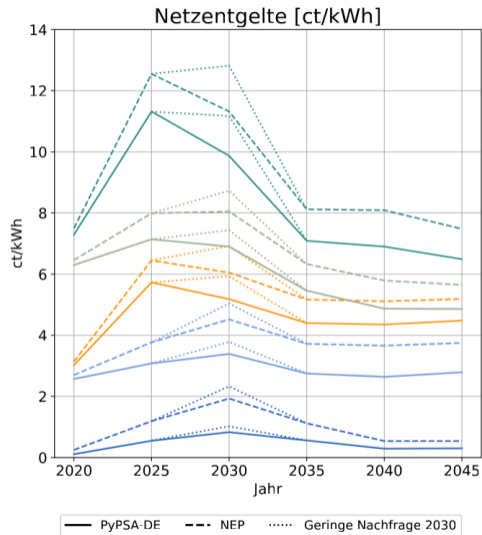
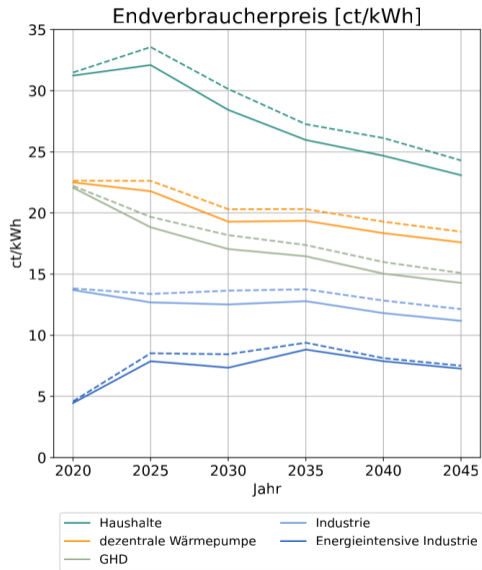
- langen Offshore-Anbindungen
- Erdkabeln für HGÜ
- einheitlicher Strompreiszone
- Inflation bei Komponentenpreisen



- **Integrierte Planung** von Strom und Wasserstoff reduziert Netzausbaukosten um **92 Mrd. €** von 283 Mrd. € auf 191 Mrd. € bis 2045 (€2020)
- **Einsparung gegenüber Netzentwicklungsplan 2023** durch **flexible Anbindung** von Offshore-Wind über Strom oder Elektrolyse an der Küste; weniger Offshore-Wind; **Freileitungen** ab 2030 für Onshore-HGÜs; Nutzung **lokaler Flexibilität**
- **Entlastet Netzentgelte** um circa 7,5 €/MWh im Durchschnitt (21%)

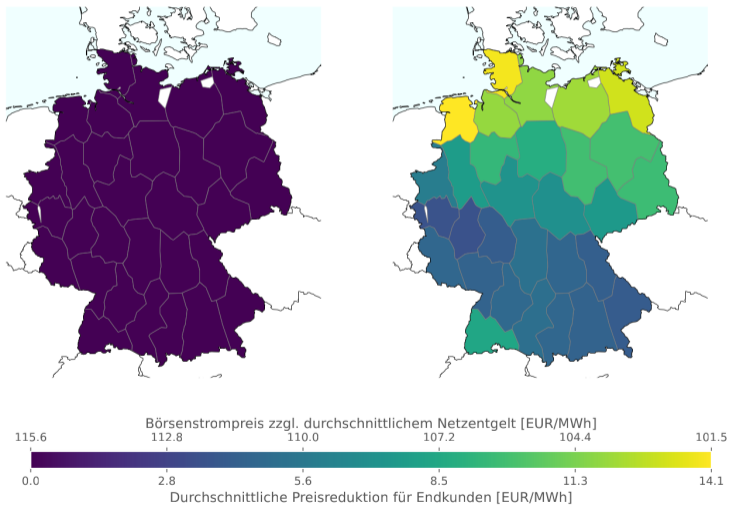


Ab 2025 sinken Endkundenpreise für Strom in fast allen Kategorien

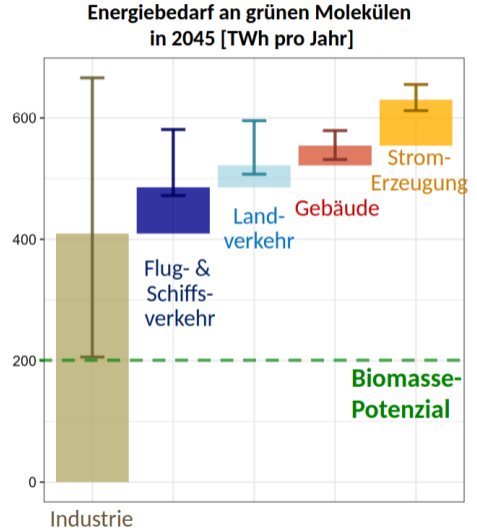


Senkung der Netzentgelte überwiegt Preisunterschiede, sodass **Preise für alle sinken**

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



- **Grüner Strom und Elektrifizierung** ersetzen 80-90% fossiler Energienutzung
- **Biomasse** kann 200-300 TWh/a des Restbedarfs decken
- Für den Rest: **grüner Wasserstoff**, Wasserstoff-Derivate, und smarte Verlagerung energie-intensiver Wertschöpfungsschritte ins Ausland



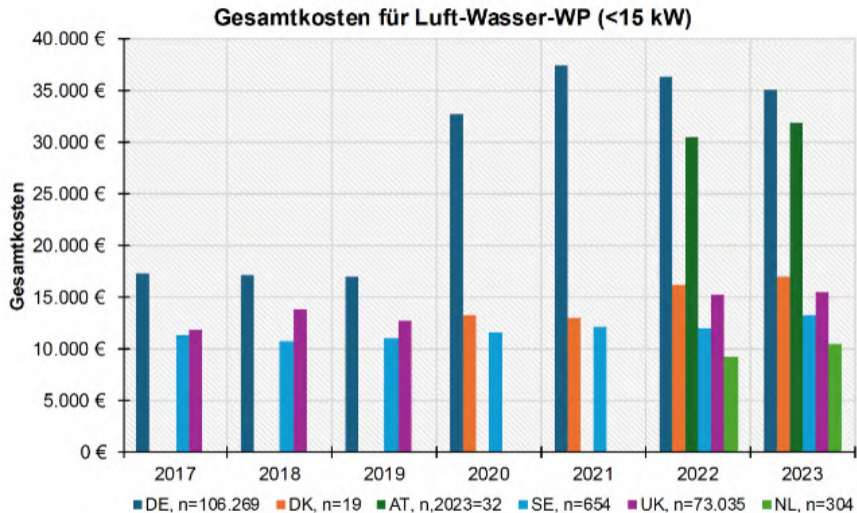
- Klimaschutz, Energiesicherheit und Kosteneffizienz sind **vereinbar**
- Der Ausbau von **erneuerbaren Energien** reduziert Energieimporte um 80%
- Strom wird bis 2030 weitgehend und bis 2035 **nahezu vollständig dekarbonisiert**
- Stromnachfrage **verdoppelt sich** bis 2045 durch **Elektrifizierung** anderer Sektoren
- **Elektrifizierung** und **Digitalisierung** führen zu geringeren Kosten
- **Integrierte Planung** von Strom und Flexibilität, ermöglicht durch **regionale Preise**, kann **ein Drittel der Ausbaurkosten im Übertragungsnetz sparen**
- **Mehrkosten für den Klimaschutz** fallen im Vergleich zu fossilen Preisschocks und Klimaschäden gering aus

All input data and code for PyPSA-Eur is open and free to download:

1. <https://github.com/pypsa/pypsa>: The modelling framework
2. <https://github.com/pypsa/pypsa-eur>: The European model

Publications (selection):

1. F. Neumann, E. Zeyen, M. Victoria, T. Brown, “*The Potential Role of a Hydrogen Network in Europe*,” *Joule* (2023), [DOI](#), [arXiv](#).
2. M. Victoria, E. Zeyen, T. Brown, “*Speed of technological transformations required in Europe to achieve different climate*,” *Joule* (2022), [DOI](#), [arXiv](#).
3. M. Victoria, K. Zhu, T. Brown, G. B. Andresen, M. Greiner, “*Early decarbonisation of the European energy system pays off*,” *Nature Communications* (2020), [DOI](#), [arXiv](#).
4. T. Brown, D. Schlachtberger, A. Kies, S. Schramm, M. Greiner, “*Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system*,” *Energy* 160 (2018) 720-739, [DOI](#), [arXiv](#).
5. J. Hörsch, F. Hofmann, D. Schlachtberger and T. Brown, “*PyPSA-Eur: An open optimization model of the European transmission system*,” *Energy Strategy Reviews* (2018), [DOI](#), [arXiv](#)
6. T. Brown, J. Hörsch, D. Schlachtberger, “*PyPSA: Python for Power System Analysis*,” *Journal of Open Research Software*, 6(1), 2018, [DOI](#), [arXiv](#).
7. D. Schlachtberger, T. Brown, S. Schramm, M. Greiner, “*The Benefits of Cooperation in a Highly Renewable European Electricity System*,” *Energy* 134 (2017) 469-481, [DOI](#), [arXiv](#).



Kosten für Netzkomponenten sind stark gestiegen

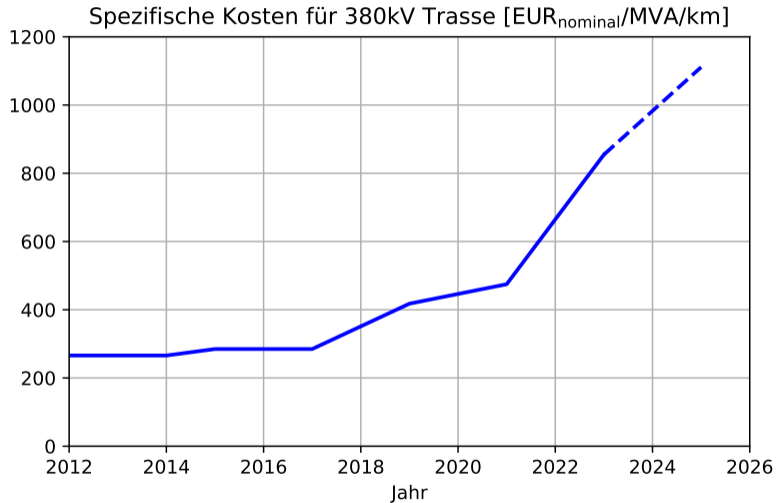
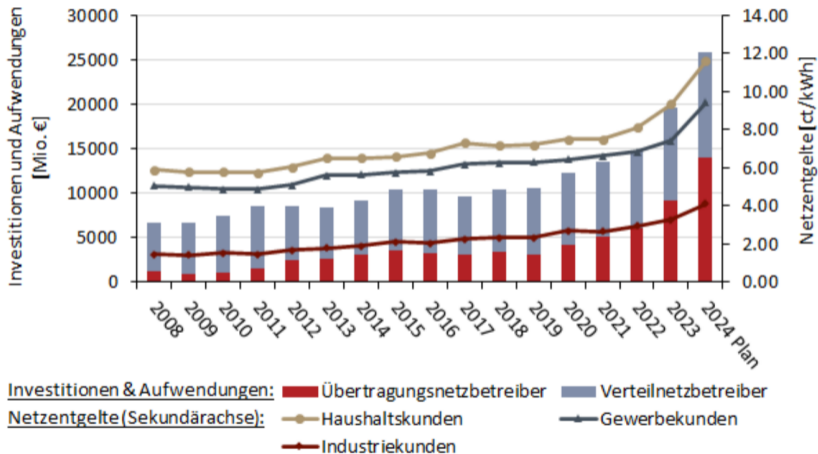
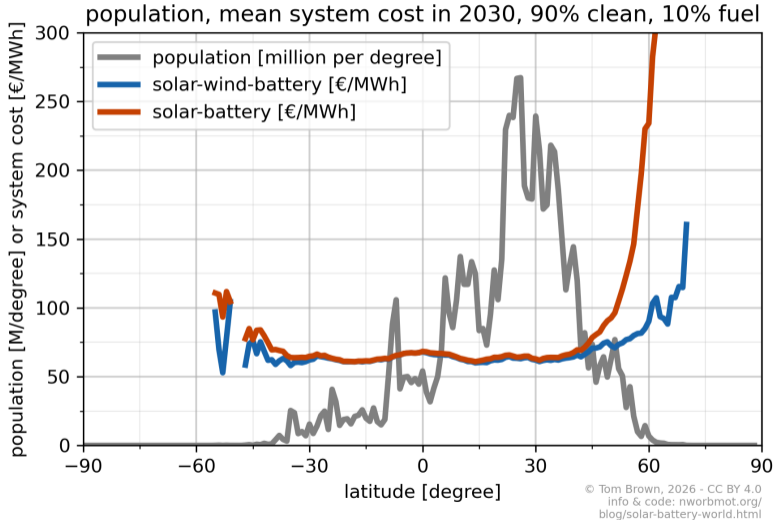


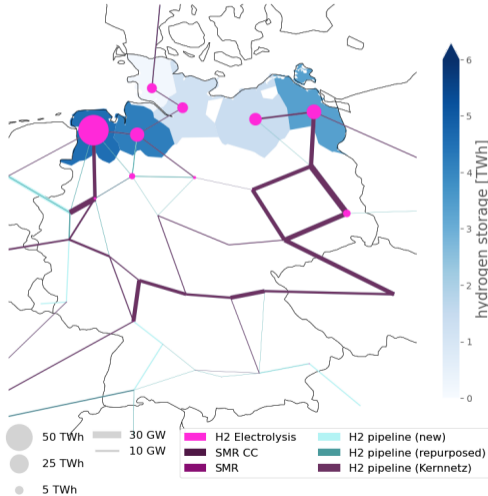
Abbildung 3-40: Entwicklung der Netzkosten und Netzentgelte der Übertragungs- und Verteilnetze



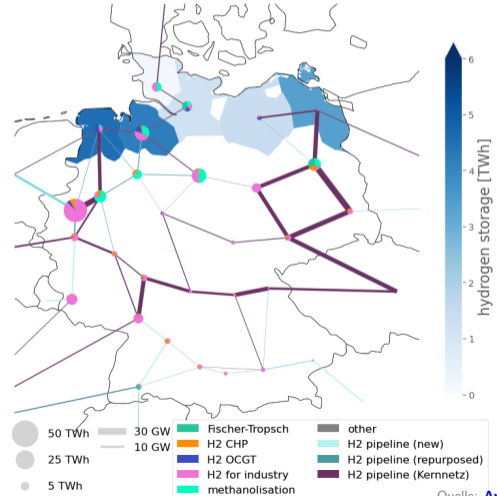


Electrolysis **positioned at coast** to absorb wind, planned Core Network appropriate for 2045.

Hydrogen infrastructure (production)

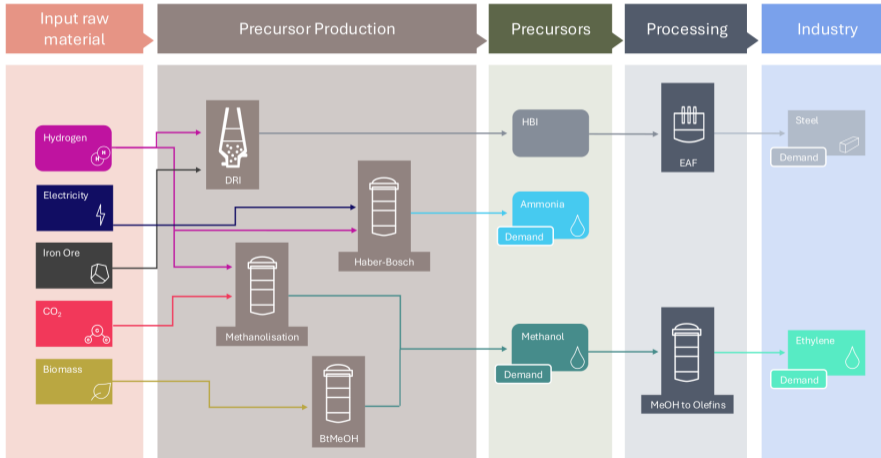


Hydrogen infrastructure (consumption)

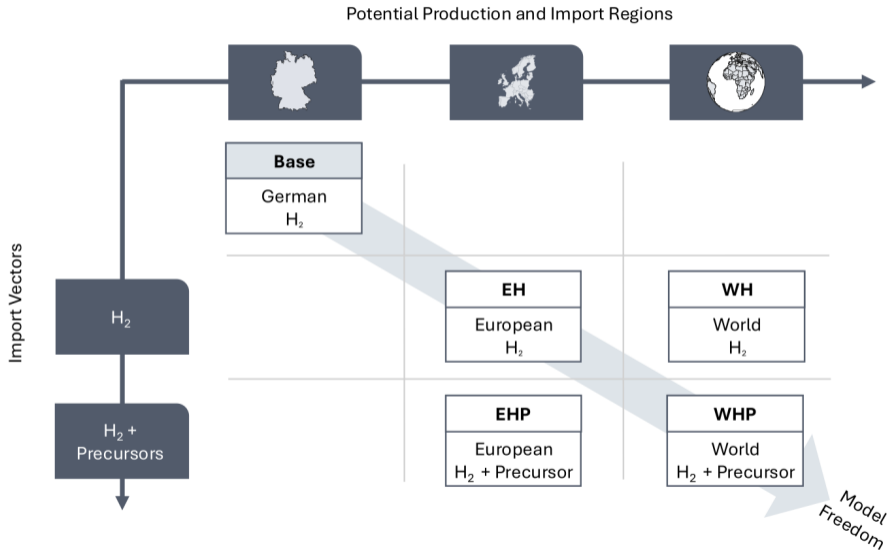


Transport derivatives, not hydrogen

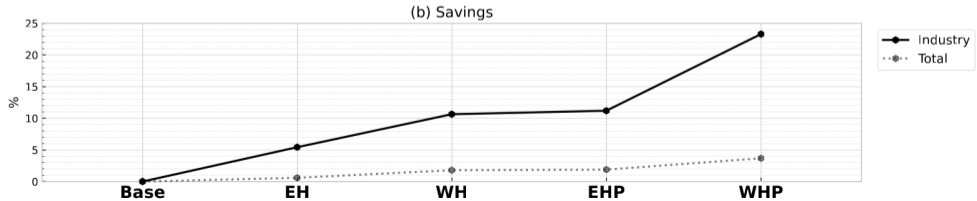
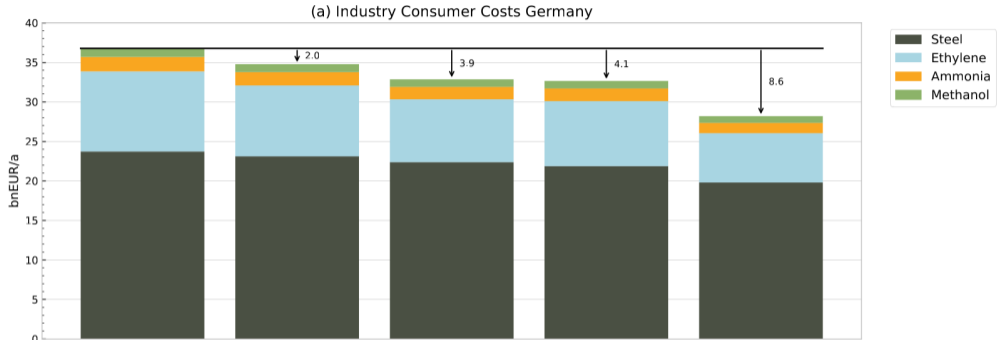
Most of hydrogen is used to produce **derivatives** like ammonia, direct-reduced iron (DRI) and methanol, precursors for energy-intensive industry and fuels for transport.



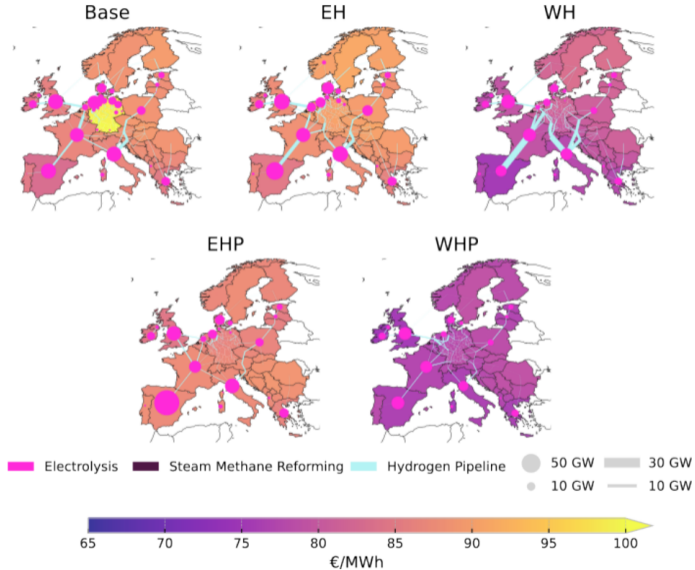
Germany could import hydrogen or precursors from Europe, World



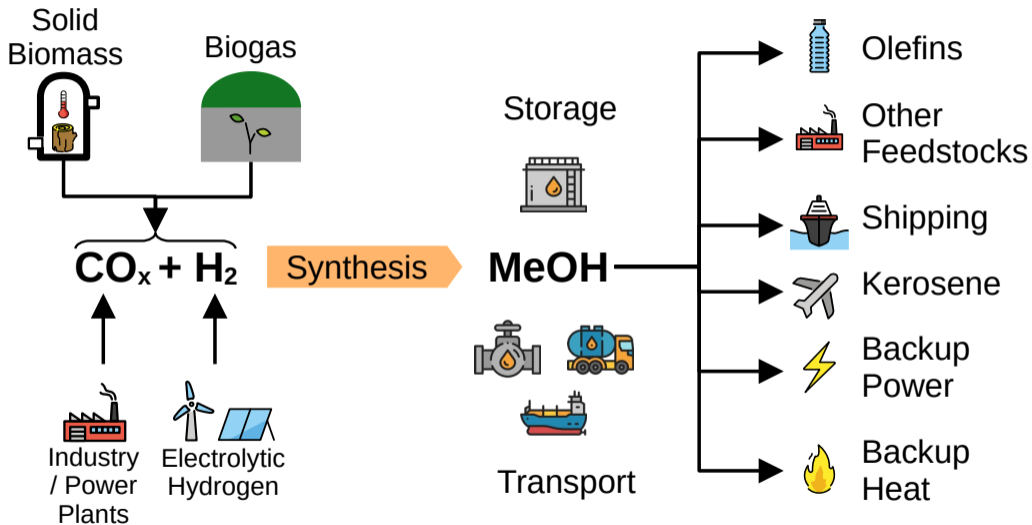
Importing from World saves most costs, from Europe 48% of that



Precursor import reduces prices & infrastructure for hydrogen



Methanol as platform for hard-to-electrify



Methanol instead of gas/hydrogen grid only 3% more expensive

