Infrastrukturplanung auf dem Weg zur Klimaneutralität

Tom Brown
t.brown@tu-berlin.de, Department of Digital Transformation in Energy Systems, TU Berlin
DPG Tagung, Berlin, 21. Oktober 2024

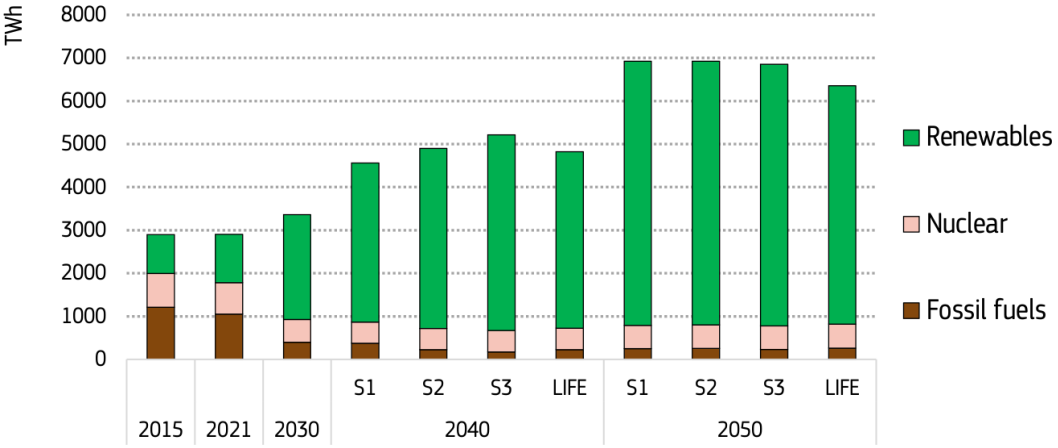
Unless otherwise stated, graphics and text are Copyright ©Tom Brown, 2022-4. Graphics and text for which no other attribution are given are licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Licence.

Table of Contents

1. Wofür brauchen wir Netze?
2. Rolle eines Wasserstoffnetzes
3. Rolle eines Kohlendioxidnetzes
4. Einfluss von grünen Imports auf Infrastruktur
5. Zusammenfassung

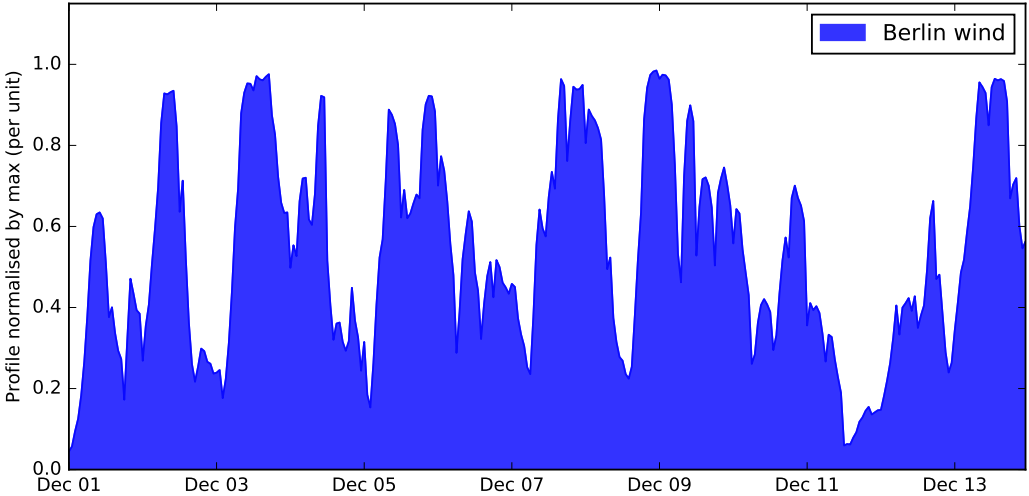
Wofür brauchen wir Netze?

Strom in der EU bis 2050: Nachfrage wächst, Erneuerbare dominieren

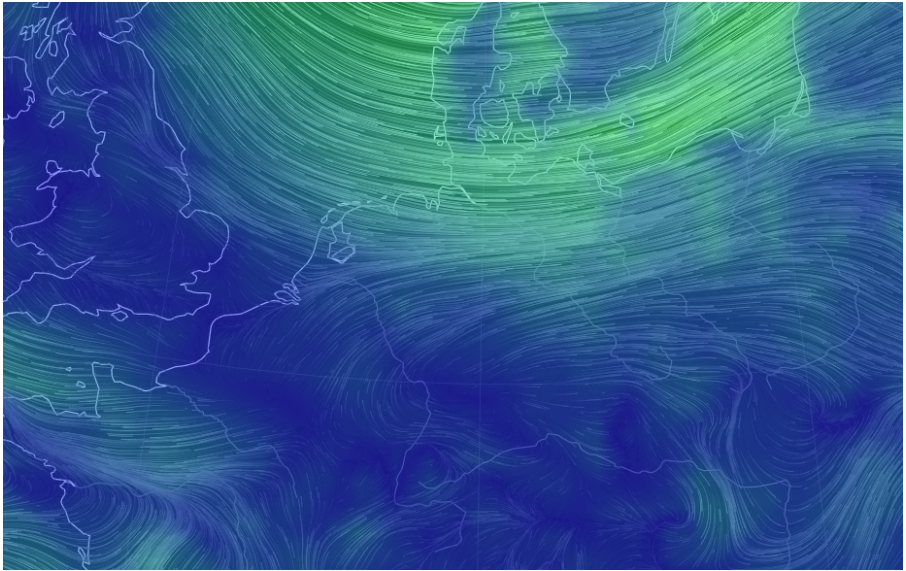


Source: EU COM 2040 Impact Assessment, 2024

Herausforderung 1: Variabilität: Standort in Berlin

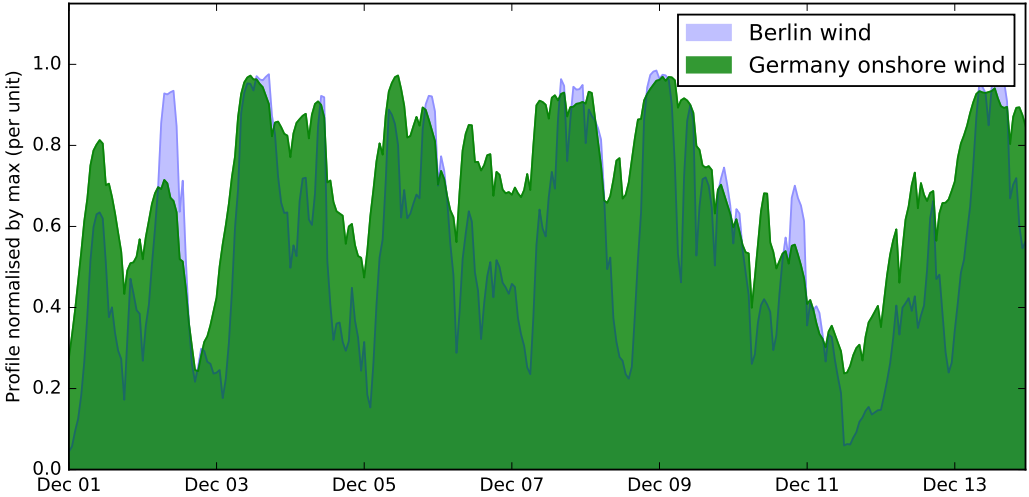


Variabilität: Unterschiedliche Windverhältnisse über Deutschland

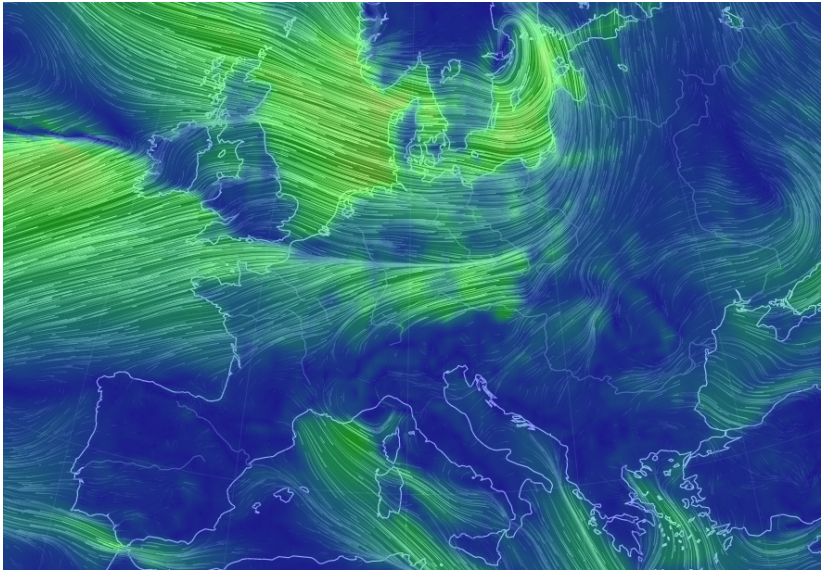


Source: https://earth.nullschool.net/

Variabilität: Ganzes Land leistet einen gewissen Ausgleich

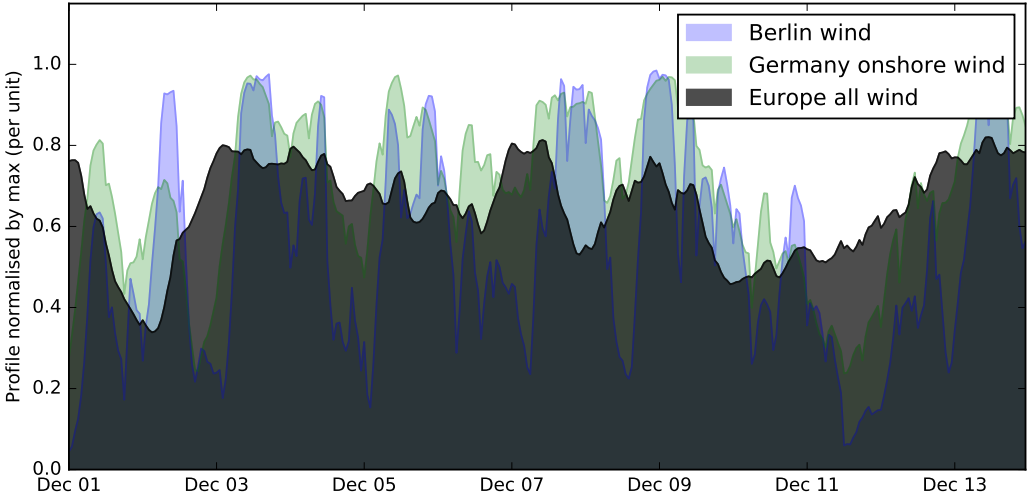


Variabilität: Räumlicher Ausgleich über Europa



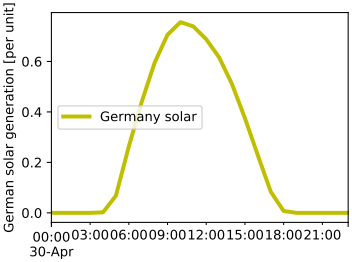
Source: https://earth.nullschool.net/

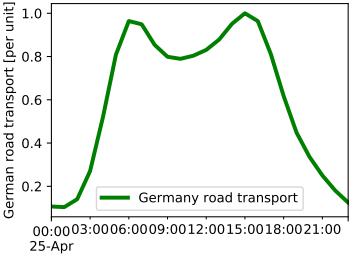
Variabilität: Kontinent Europa: Fast ausgeglichen



Herausforderung 2: Netze stößen in einigen Regionen auf Widerstand

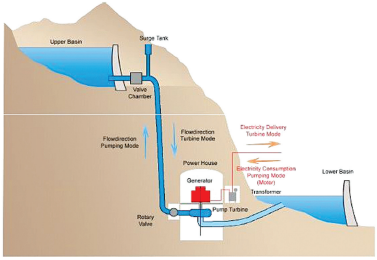
Speicherkonzepte: Tägliche Schwankungen



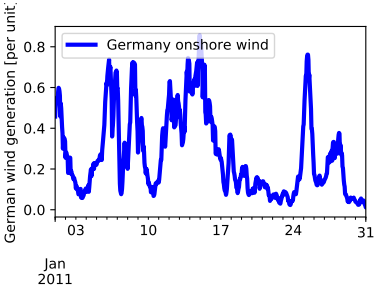


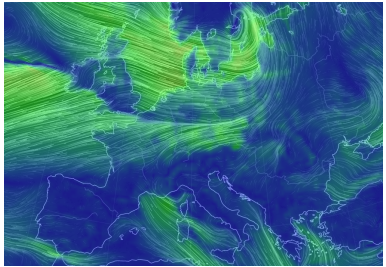
Tägliche Schwankungen von Angebot und Nachfrage können ausgeglichen werden durch

- **Kurzzeitspeicher** (z.B. Batterien, Pumpspeicherwerke, Wärmespeicher)
- **Lastmanagement** (z.B. durch Batterie-Elektrofahrzeuge, Industrie)
- **Ost-West-Netze**



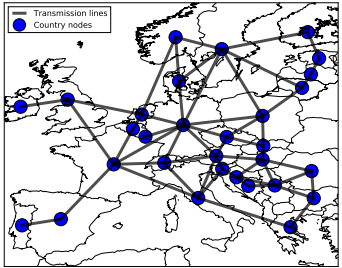
Speicherkonzepte: Wöchentliche Schwankungen



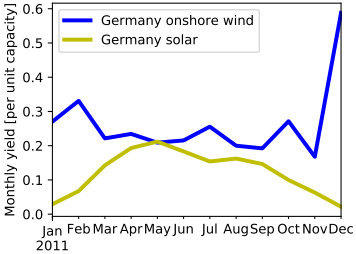


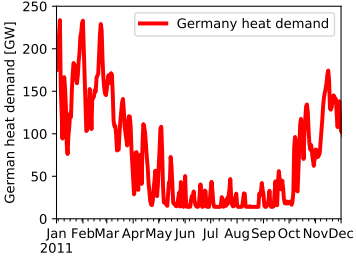
Wöchentliche durch

- **mittelfristige Speicherung** (z.B. chemisch mit Wasserstoff- oder Methanspeichern, thermisch mit Wasserstanks, Stauseen)
- **Kontinentale Netze**



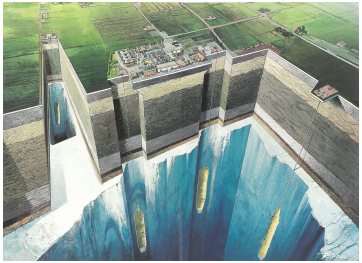
Speicherkonzepte: Saisonale Schwankungen



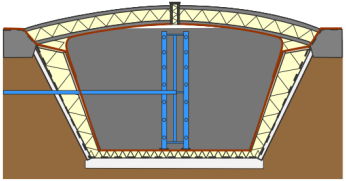


Saisonale durch

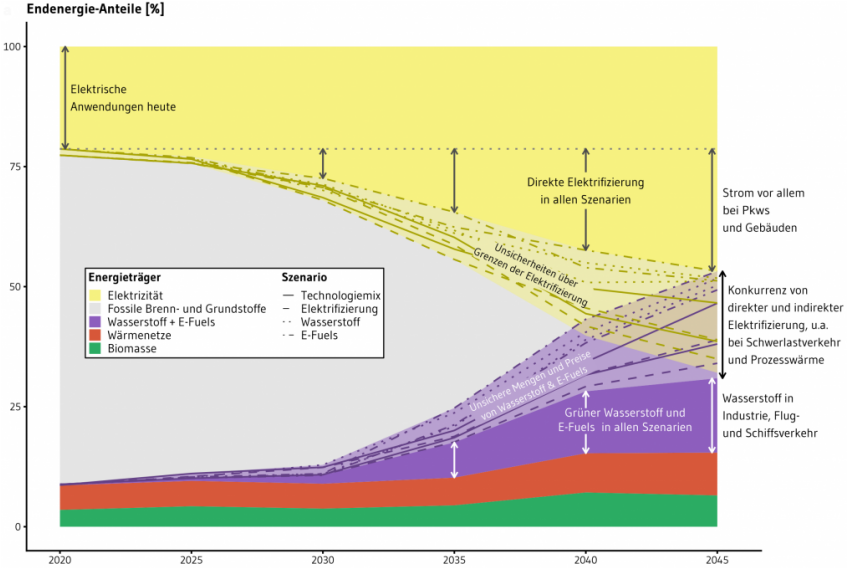
- **Langzeitspeicher** (z.B. unterirdische Wasserstoff- oder Methanspeicher, Flüssigkeiten, langfristige thermische Energiespeicher, Wasserkraft mit Staudämmen)
- **Nord-Süd-Netze über mehrere Breitengrade**



Pit thermal energy storage (PTES)
(60 to 80 kWh/m³)



Herausforderung 3: Strom kann nicht alle Bedarfe decken



Source: Ariadne Dossier, 2021

Der Einsatz von Wasserstoff muss priorisiert werden

Technische Universität Berlin

Einsatzbereiche sauberen Wasserstoffs

(Schätzungen, nach Michael Liebreich, 2021)

Alternativlos

- **A**: Dünge-mittel; Hydrierung; Methanol; Hydro-cracken; Ent-schwefelung
- **B**: Schiff-fahrt*; Mobile Maschinen & Geräte; Chemischer Rohstoff; Roh-stahl; Langfrist-Stromspeicher
- **C**: Langstrecken-flüge*; Küsten- & Binnenschifffahrt; Entlegener Zugverkehr; Oldtimer-Fahrzeuge*; Dezentrale Methanisierung
- **D**: Mittelstrecken-flüge*; Fernverkehr-Lkw und Reisebusse; Industrielle Hoch-temperatur-Wärme; Strom-erzeugung
- **E**: Kurzstrecken-flüge; Lokale Fähren; Gewerbliche Raumwärme; Insel-netze; Grüner Energieimport; Unterbrechungsfreie Stromversorgung
- **F**: Leicht-Flugzeuge; Ländlicher Zugverkehr; Lkw Verteiler-verkehr; Industrielle Niedertemp.-Wärme; Wohnraum-wärme
- **G**: U-Bahnen & Stadtbusse; Brennstoff-zellen-Pkw; Stadtliefer-wägen; Zwei- und Dreiräder; Massenproduk-tion von E-Fuels; Regel-leistung

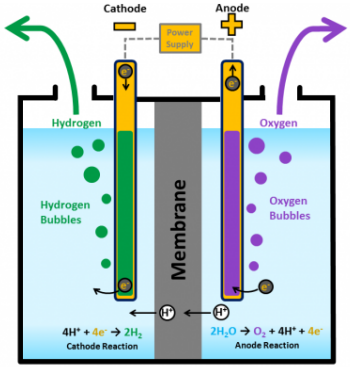
Unwirtschaftlich

* Sehr wahrscheinlich in Form von mittels Wasserstoff erzeugten E-Fuels oder Ammoniak.

© Gregor Hagedorn, Wolf-Peter Schill & Martin Kittel, based on Michael Liebreich/Liebreich Associates, Clean Hydrogen Ladder, Version 4.1, 2021. Concept credit: Adrian Hiel, Energy Cities & Paul Martin. CC-BY 4.0

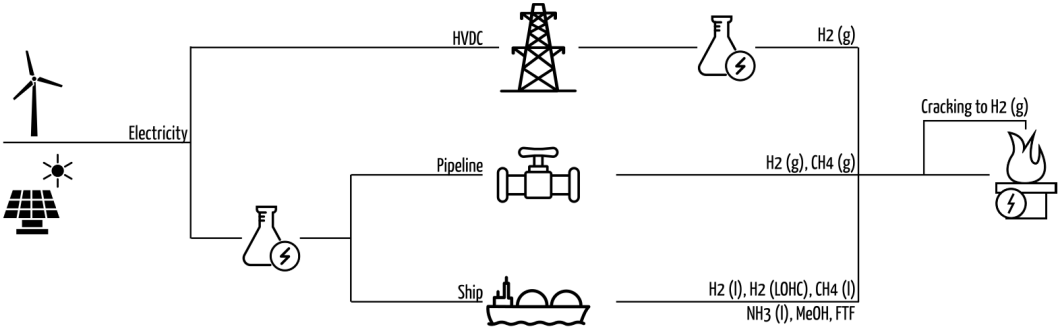
Die Rolle eines möglichen Wasserstoff-Pipeline-Netzes

- Ein **Wasserstoffnetz** würde Regionen mit günstigem, grünem, aus Elektrolyse gewonnenen Wasserstoff mit der Nachfrage **verbinden**
- Es könnte auch teilweise den **Ausbau des Stromnetzes entlasten**



Wasserstoff-Derivaten können auch per Schiff importiert werden

Wasserstoff-**Derivaten** wie Ammoniak (NH_3) oder Methanol (CH_3OH) können auch aus der ganzen Welt von an Erneuerbaren reichen Regionen importiert werden.



Source: Hampp et al, 2023

Welche Infrastrukturen brauchen wir?

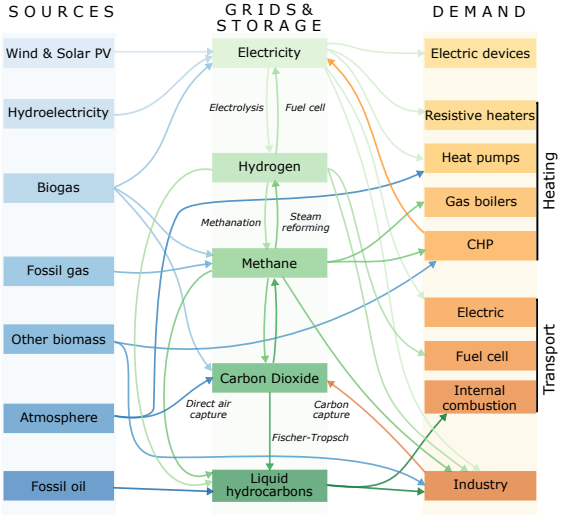
- **Stromnetze**, um Standorte mit erneuerbaren Ressourcen mit der Nachfrage zu verbinden und die Variabilität auszugleichen
- **Wasserstoffnetze**, wo wir Wasserstoff für Speicherung und nicht elektrifizierbare Energie/Grundstoffe benötigen (kann auch **Derivate** sein wie Ammoniak, Methanol)
- **Kohlendioxidnetze** für CO_2-Abscheidung, Sequestrierung, Entnahme, e-Kraftstoffe und e-Grundstoffe (‚Carbon Management')

Aber was davon ist **unbedingt notwendig** und wo befinden sich die **Trade-Offs**?

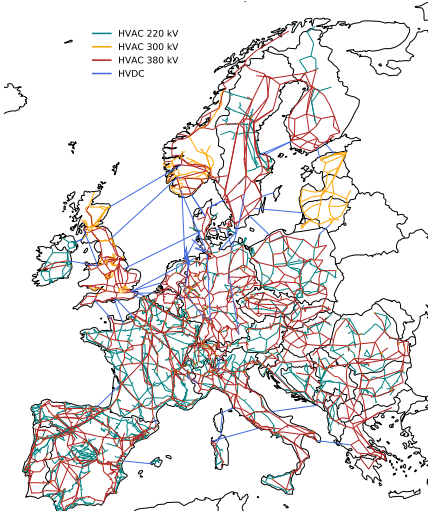
Rolle eines Wasserstoffnetzes

Modell für Europa: PyPSA-Eur

Umfasst alle Energieflüsse...



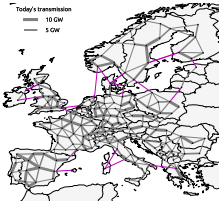
und Netzengpässe in Energienetzen.



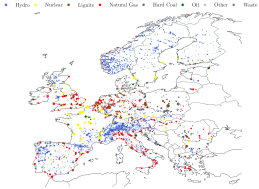
Datengestützte Energiemodellierung

Bei der Modellierung kommen viele verschiedene Daten und Prozesswissen zusammen.

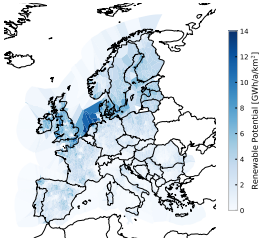
clustered network model



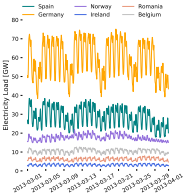
power plants and technology assumptions



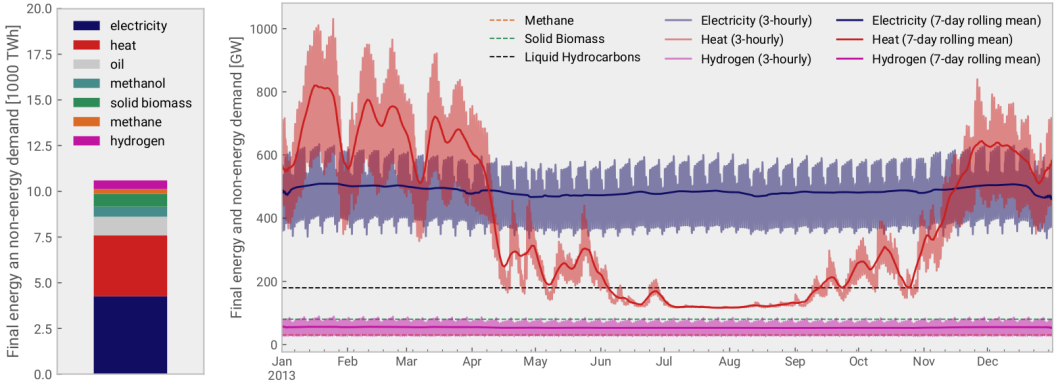
renewable potentials and hourly time series for each region



demand projections time series



Endenergie- und Rohstoffnachfrage für ein Netto-Null-Szenario



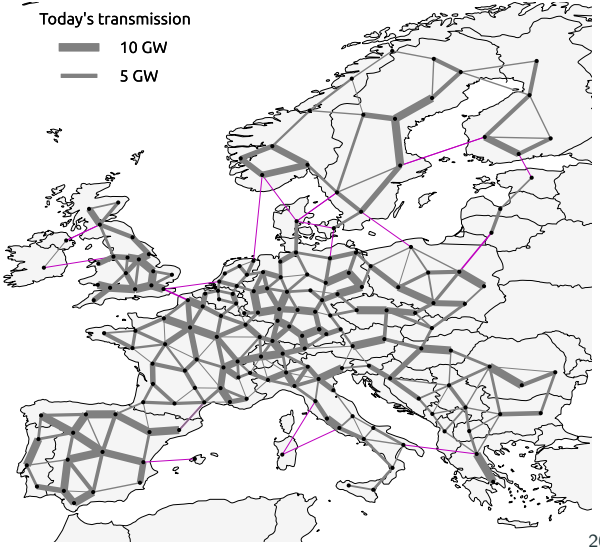
Source: Neumann et al, 2023

Ergebnisse für 181-Knoten-Modell des europäischen Energiesystems

- Kopplung **aller Energiesektoren** (Strom, Wärme, Verkehr, Industrie)
- Netto-CO_2-Emissionen **auf Null**
- CO_2-Sequestrierung 200 $MtCO_2/a$
- Basisfall ohne **Energieimporte**
- 181 **kleinere Gebotszonen**

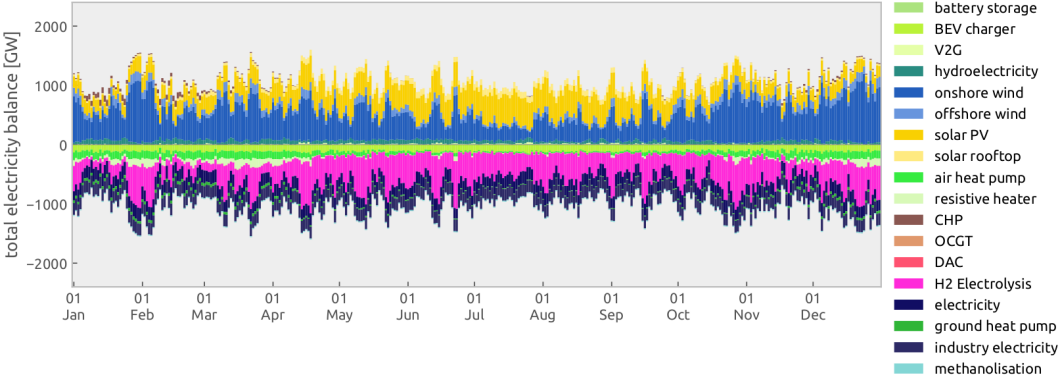
Untersuchung der Auswirkungen von:

- **Stromnetzausbau**
- Neuem **Wasserstoffnetz**
- **Importen von H_2-Derivaten**



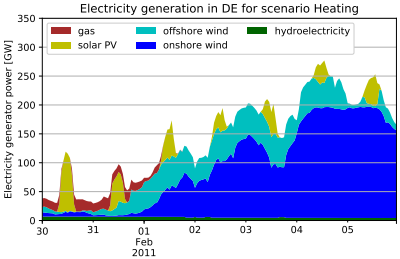
Tägliche Durchschnitte der stündlichen Strombilanz

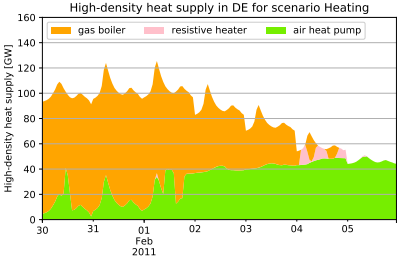
Solar und Wind ergänzen sich saisonal gut; Nachfrage (negativ) im Winter dank des Einsatzes von Wärmepumpen höher; Elektrolyseure haben Kapazitätsfaktoren im Bereich von 40-60%.



Source: Neumann et al, 2023

Beispiel von Schwierigkeiten: Kalte Dunkelflaute





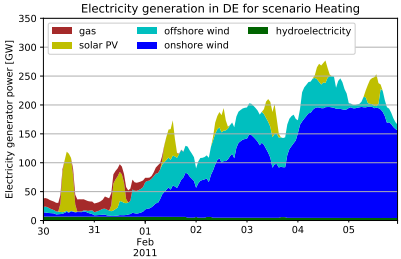
Es gibt schwierige Perioden im Winter mit:

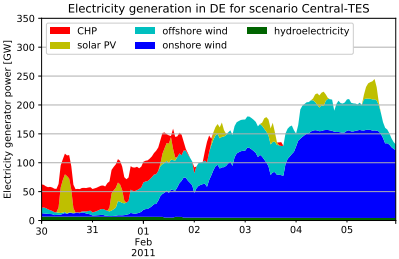
- **Niedrige** Wind- und Solarenergie (⇒ hohe Preise)
- **Hoher** Raumwärmebedarf
- **Niedrige** Lufttemperaturen, die sich auf die Leistung von Luftwärmepumpen auswirken

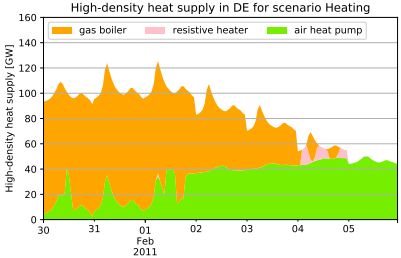
Unelegante Lösung: **Backup-Gasheizkessel**

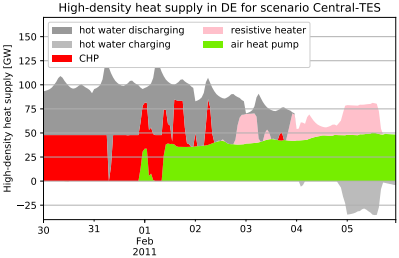
Intelligente Lösung: **Gebäudesanierung**, **Langzeit-Wärmespeicher** in **Fernwärmenetzen** und effiziente **Kraft-Wärme-Kopplung**

Kalte Dunkelflaute: unelegant (links); intelligent (rechts)





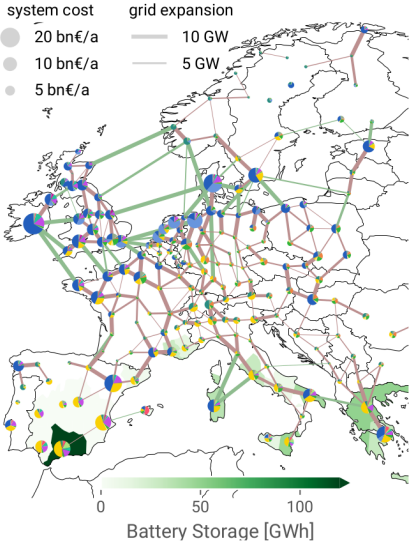




Source: Brown et al, "Synergies of sector coupling," 2018

Verteilung der Technologien bei Verdopplung des Stromnetzes

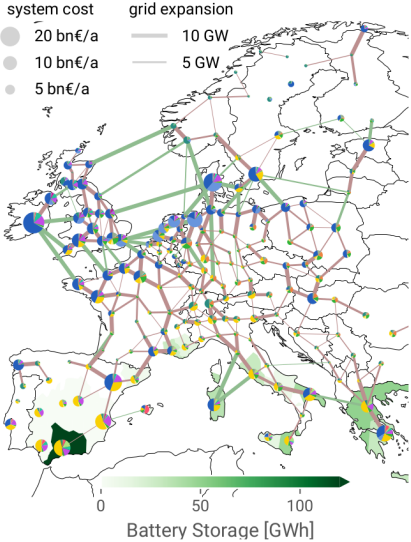
Stromnetzausbau von 413 TWkm...



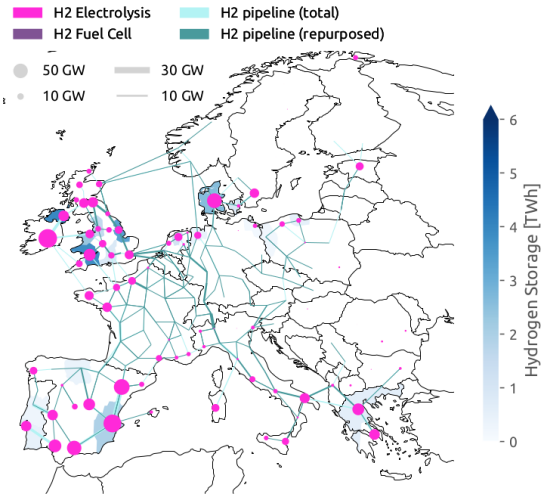
Source: Neumann et al, 2023

Verteilung der Technologien bei Verdopplung des Stromnetzes

Stromnetzausbau von 413 TWkm...

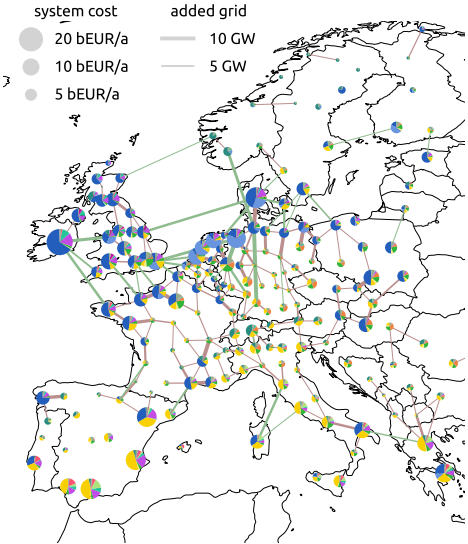


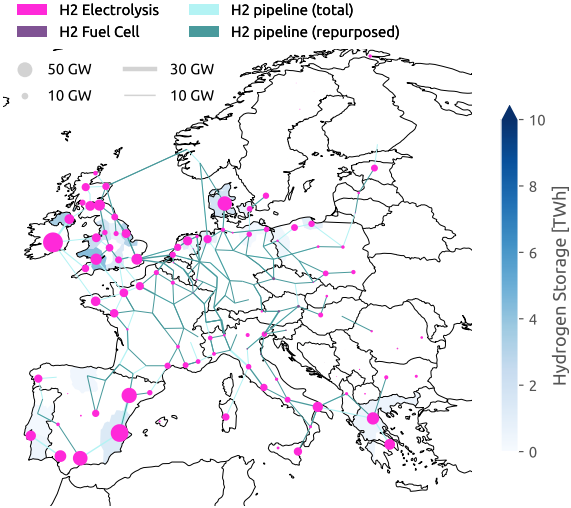
...und neues Wasserstoffnetz von 204 TWkm.



Source: Neumann et al, 2023

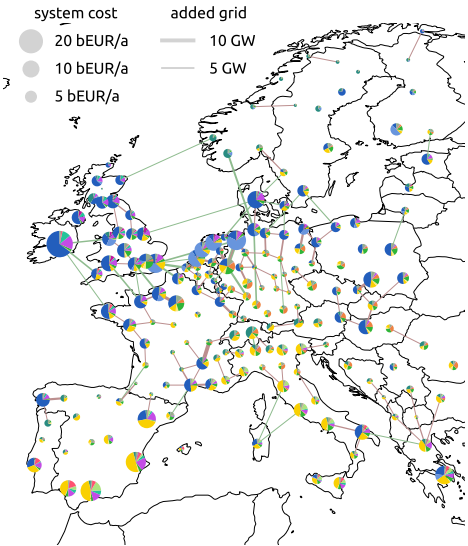
Verteilung der Technologien bei 50% mehr Stromnetz

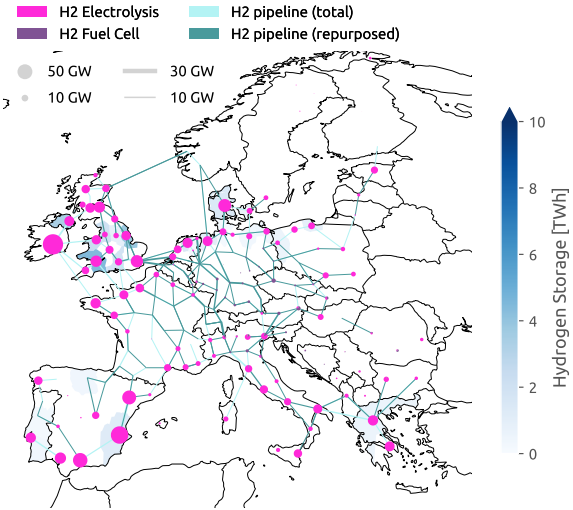




Source: Neumann et al, 2023

Verteilung der Technologien bei 25% mehr Stromnetz

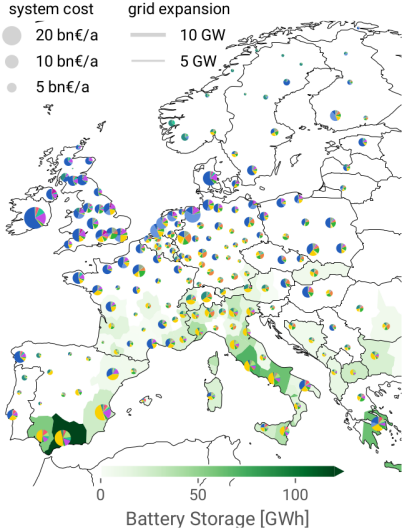




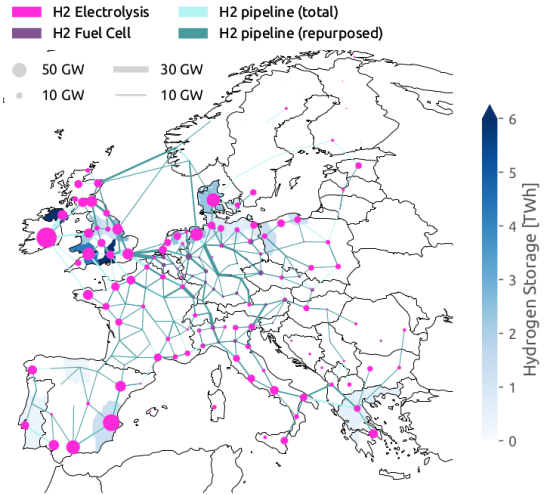
Source: Neumann et al, 2023

Verteilung der Technologien ohne Stromnetzausbau

Kein Stromnetzausbau...

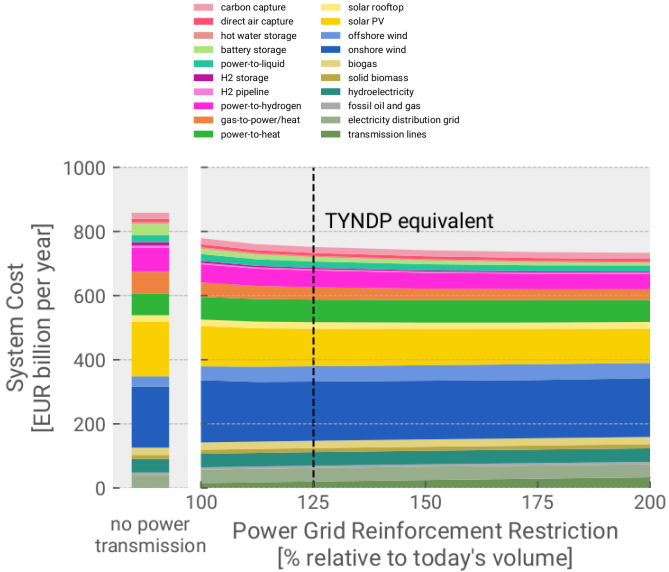


...und neues Wasserstoffnetz von 307 TWkm.



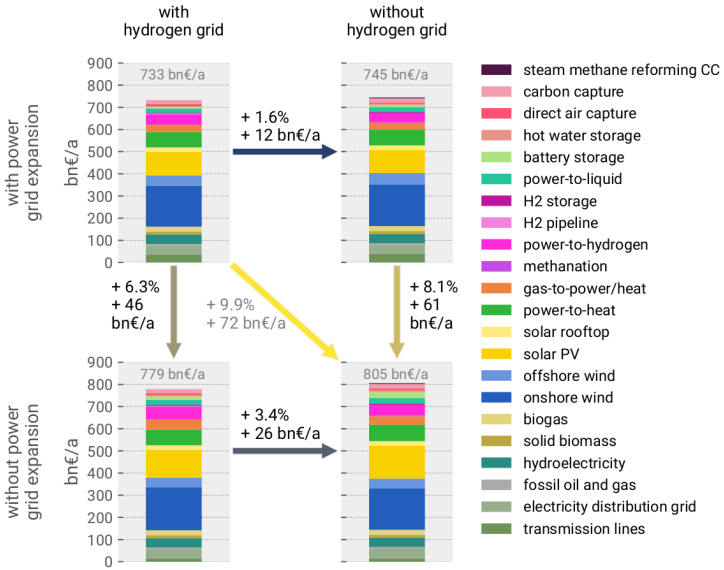
Source: Neumann et al, 2023

Vorteil von Stromnetzausbau für ein sektorgekoppeltes System



- Direkte Systemkosten **etwas höher als das heutige System** ($\sim$ € 700 Mrd. pro Jahr bei gleichen Annahmen)
- Dezentrale Systeme **ohne Netzausbau** sind machbar, aber teurer
- Mit dem Netzausbau sinken die Ausgaben für Solar, Elektrolyse und H_2-Netz; mehr Offshore-Wind
- **Kostenvorteil des Netzausbaus**: $\sim$ € 50 Mrd. pro Jahr
- **Mehr als die Hälfte des Nutzens ist bei einem 25% Ausbau verfügbar**

Mit und ohne Wasserstoffnetz

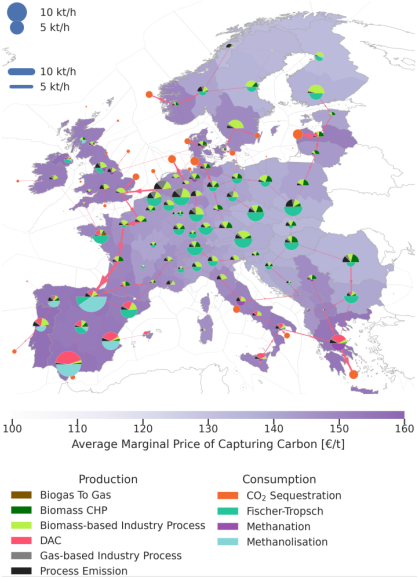


- Ausbau von beiden Netzen vorteilhaft
- **Nettonutzen** des Wasserstoffnetzes: € 12-26 Mrd. pro Jahr
- Wasserstoffnetz bringt **starken Nutzen**, angenommen: keine Energieimporte, keine Industrieverlagerung
- Nutzen ist am stärksten ohne Stromnetzausbau

Source: Neumann et al, 2023

Rolle eines Kohlendioxidnetzes

Abscheidung, Nutzung, Transport und Speicherung von Kohlendioxid

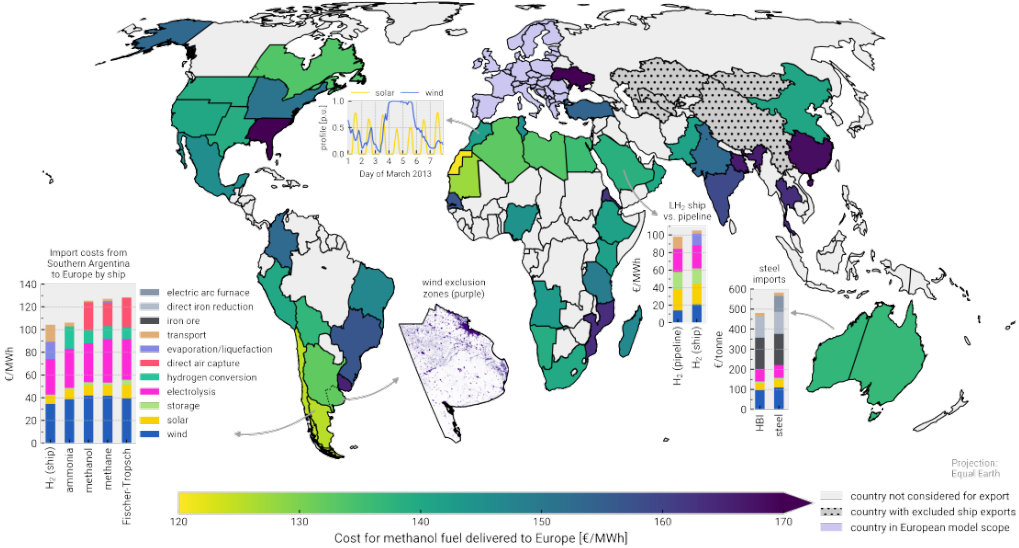


- Wir brauchen **CO_2-Abscheidung** und **Speicherung** (CCS) für unvermeidbare Emissionen (z.B. von Zementindustrie), **Nutzung** (CCU) für e-fuels und Grundchemikalien, **Carbon Dioxide Removal** (CDR) für negative Emissionen
- Diese werden unter **Carbon Dioxide Management** zusammengefasst
- CO_2 kann als Flüssigkeit **per Pipeline transportiert** werden
- Erlaubt effiziente Einbindung von Quellen wie nachhaltiger Biomasse, **minimiert** die direkte Luftabscheidung (DAC)

Source: Hofmann et al, 2024

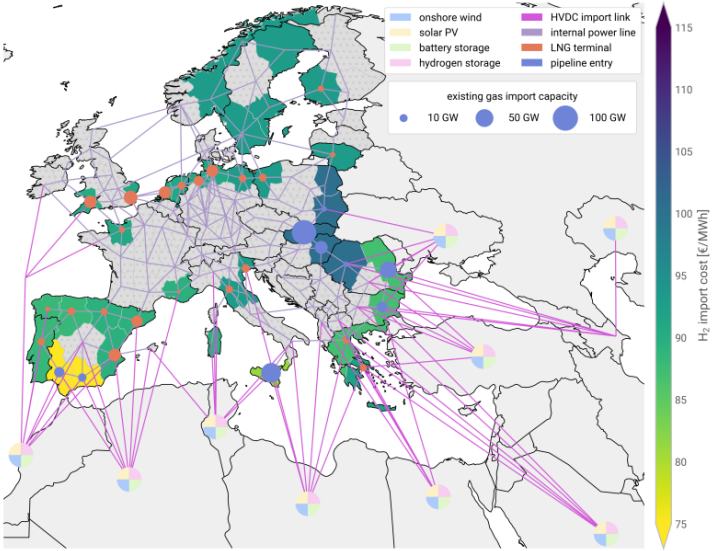
Einfluss von grünen Imports auf Infrastruktur

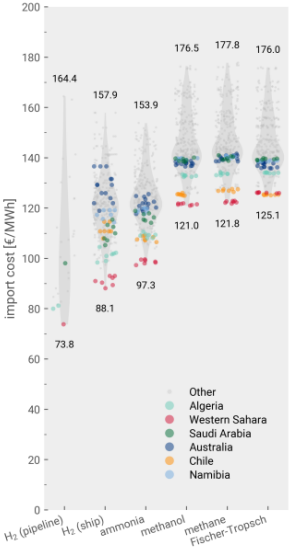
Import von grüner Energie und Grundstoffen aus der ganzen Welt



Source: Neumann et al, 2024

Erlaubte Importrouten

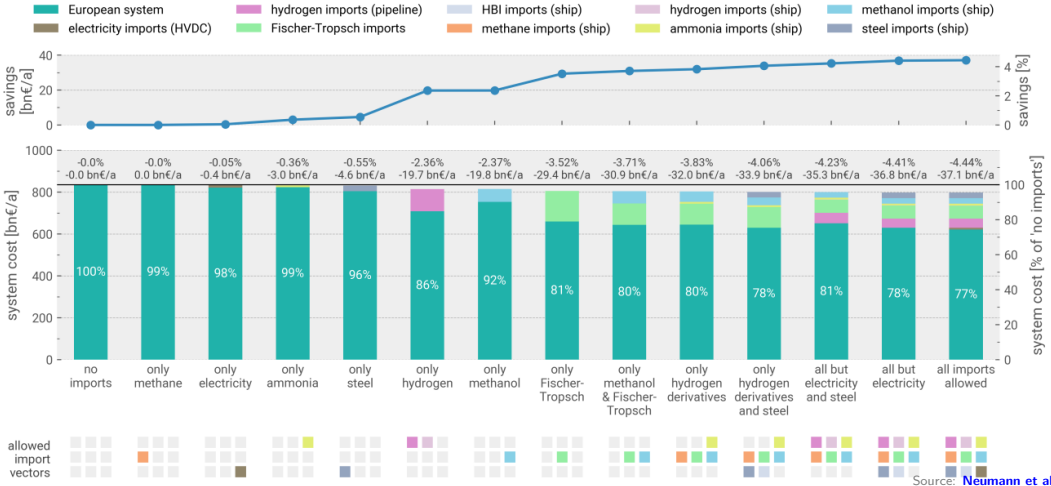




Source: Neumann et al, 2024

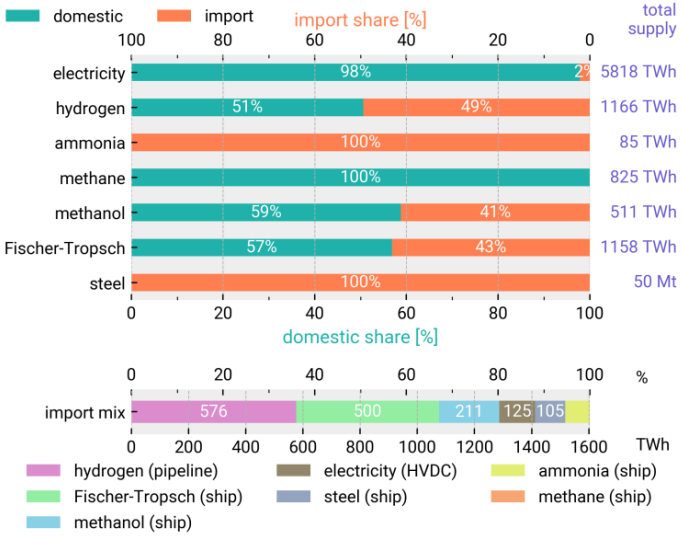
Auswirkungen verschiedener Importe auf die Systemkosten

Durch Importe von grünem Stahl, Ammoniak und kohlenstoffinhaltigen Molekülen wird € 37 Mrd. pro Jahr gespart.



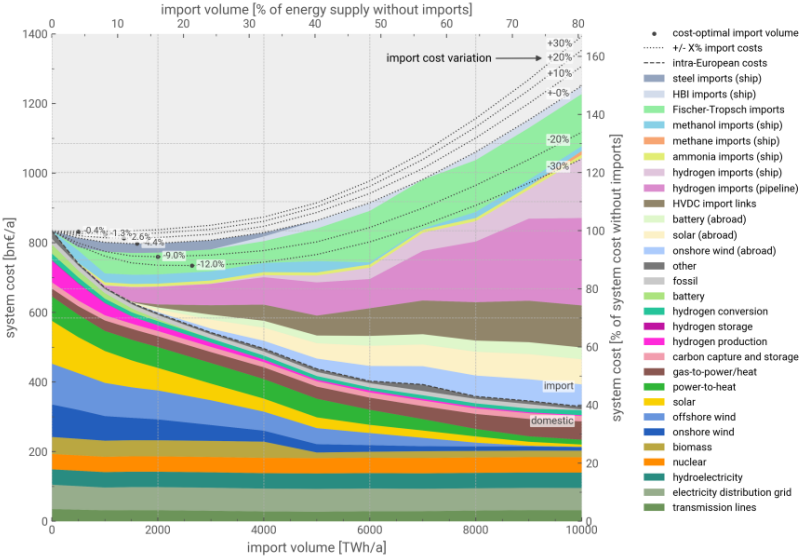
Source: Neumann et al, 2024

Strom wird immer noch lokal erzeugt; Moleküle eher nicht



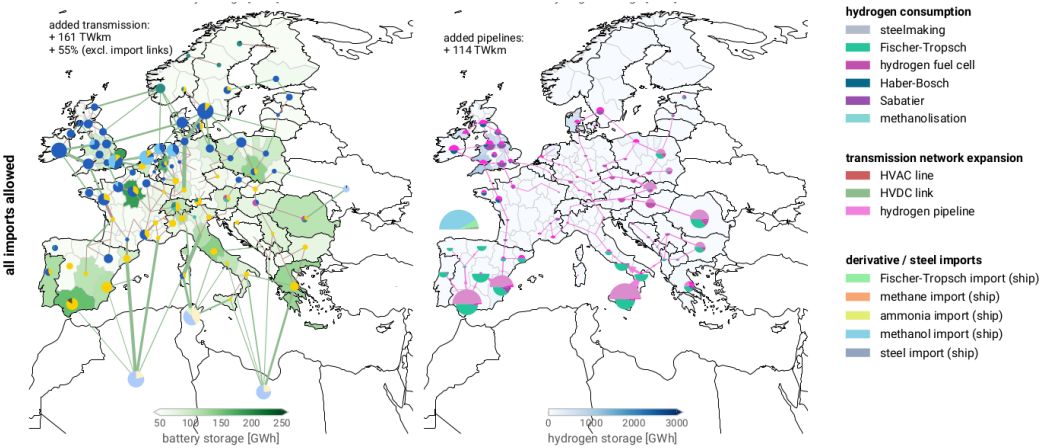
Source: Neumann et al, 2024

Flacher Lösungsraum um 1000-2000 TWh/a



Source: Neumann et al, 2024

Wasserstoffnetz dünnt sich mit Importen aus



Source: Neumann et al, 2024

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Eine **sektorintegrierte Planung** ist erforderlich, um Infrastrukturbedarf zu verstehen
- **Stromnetzausbau** bringt Nutzen von € 46-61 Mrd. pro Jahr (6,3-8,1% der Kosten)
- Ein europäisches **Wasserstoffnetz** kann die Systemkosten um € 12-26 Mrd. pro Jahr (1,6-3,4%) senken, insbesondere wenn der Ausbau des Stromnetzes begrenzt wird
- Ein **Kohlendioxidnetz** hilft um kostengünstigere Quellen wie nachhaltige Biomasse mit Sequestrierung und Kraftstoffsynthese zu verbinden und DAC zu minimieren
- **Import von grünen Molekülen** reduziert Kosten um bis zu € 37 Mrd. pro Jahr (4,4%), man muss aber geopolitisches Risiko, lokale Auswirkungen und Diversifizierung mitdenken
- Lösungen finden, die **robust gegenüber Unsicherheit** sind ⇒ viele Szenarien berechnen, etwas teurere ‚nahezu optimale' Lösungen untersuchen

More information

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

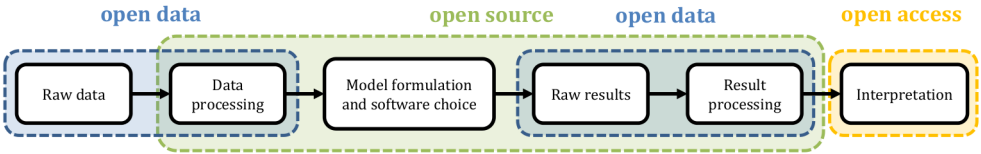
Publications (selection):

1. F. Neumann, E. Zeyen, M. Victoria, T. Brown, *"The Potential Role of a Hydrogen Network in Europe,"* arXiv preprint (2022), **arXiv**.
2. 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**.
3. 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**.
4. 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**
5. T. Brown, J. Hörsch, D. Schlachtberger, *"PyPSA: Python for Power System Analysis,"* Journal of Open Research Software, 6(1), 2018, **DOI**, **arXiv**.
6. 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**.

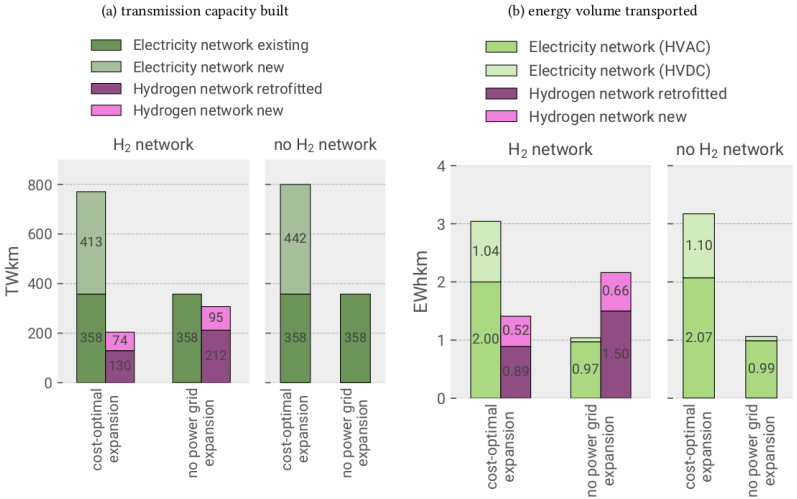
Ansatz: Offene Daten und Modelle

Weil Energiemodelle von **öffentlichem Interesse**, **höchst komplex** und **Annahme getrieben** sind, setzen wir auf **offene Energiemodellierung**. Offen bedeutet, dass es jedem freisteht, die Software und Daten herunterzuladen, einzusehen, zu bearbeiten und zu teilen.

Die gesamte Pipeline sollte offen sein:



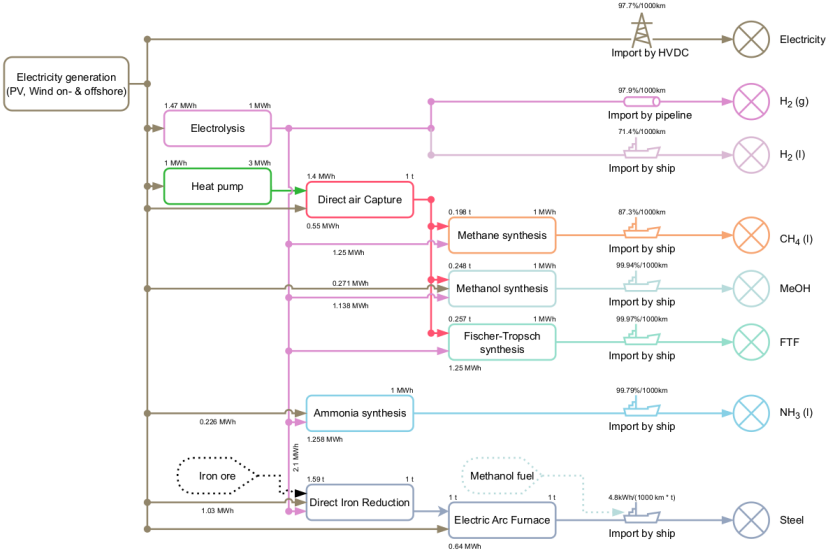
Energy grid in different cases



- More hydrogen grid with less power grid
- Without power expansion, hydrogen transports more energy
- Hydrogen grid is not perfect substitute
- Two-thirds of hydrogen grid can re-use methane pipes

Source: Neumann et al, 2023

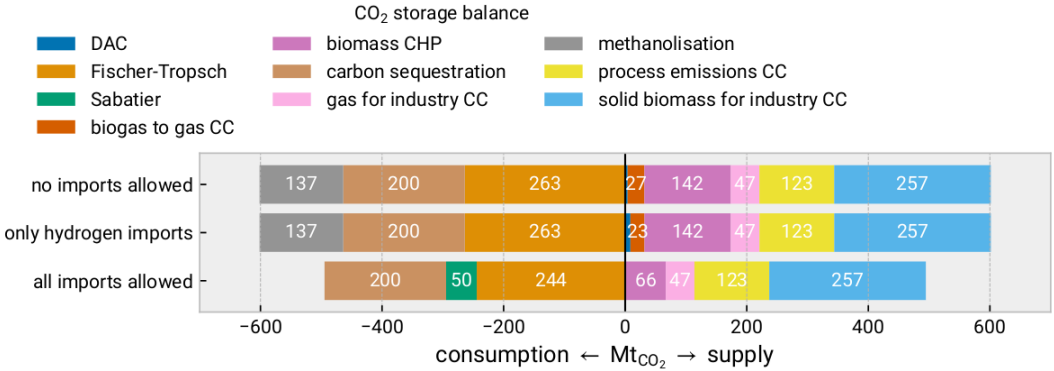
Energy imports



Source: Neumann et al, 2024

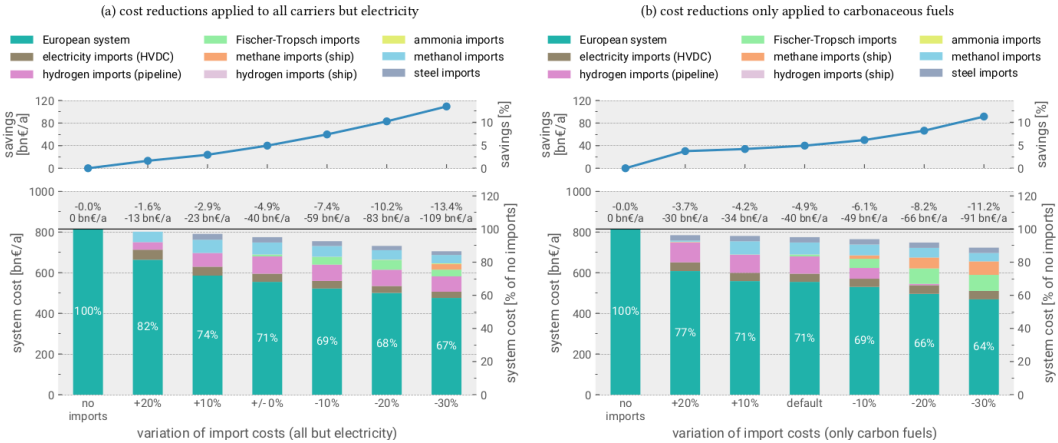
CO_2 balance

CCU and CCS take CO_2 from sustainable biomass and process emissions.



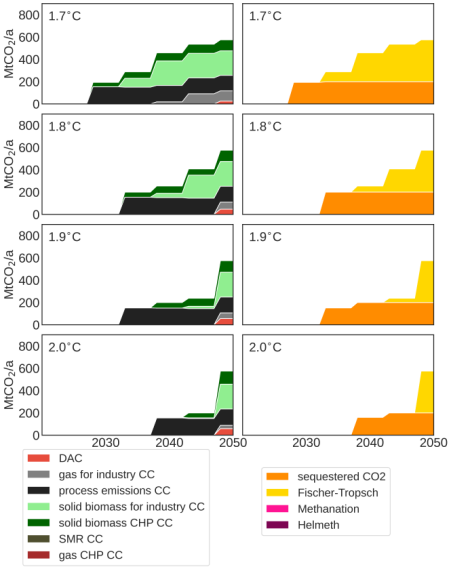
Source: Neumann et al, 2024

Effects of cost sensitivity



Source: Neumann et al, 2024

Carbon Management



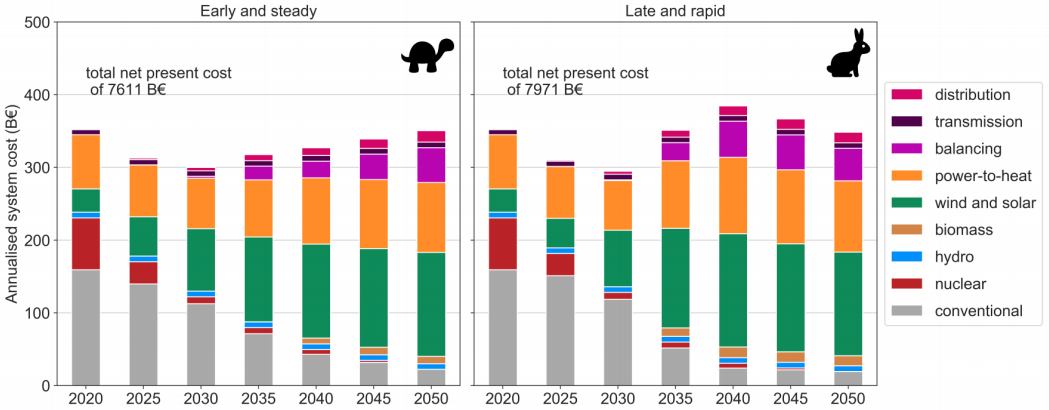
- Carbon capture (left): from process emissions, but also from heat production in industry and for combined-heat-and-power (CHP) plants
- Sequestration limited to 200 $MtCO_2/a$ (enough to cover today's process emissions)
- Further carbon capture is used for Fischer-Tropsch fuels (kerosene and naphtha)
- The tighter the CO_2 budget, the more is captured, and at some point direct air capture (DAC) also plays a role
- If sequestration is relaxed to 1000 $MtCO_2/a$, then CDR compensates unabated emissions elsewhere

Source: **M. Victoria et al, 2021**

Pathway for European energy system from now until 2050

For a fixed CO_2 budget, it's more cost-effective to **cut emissions early** than wait.

NB: These results only include electricity, heating in buildings and land-based transport.



Source: M. Victoria et al, Nature Communications (2020)