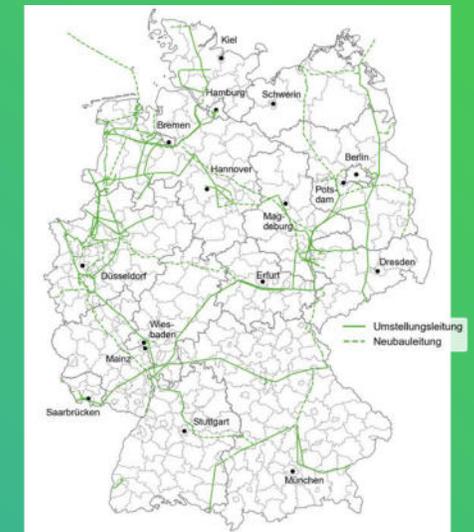


Institutionenökonomische Ausgestaltung eines potenziellen Wasserstoffsektors mit zentraler und dezentraler Koordination

Unsicherheiten und Parallelitäten zu anderen Infrastrukturentwicklungen “ex-nihilo”

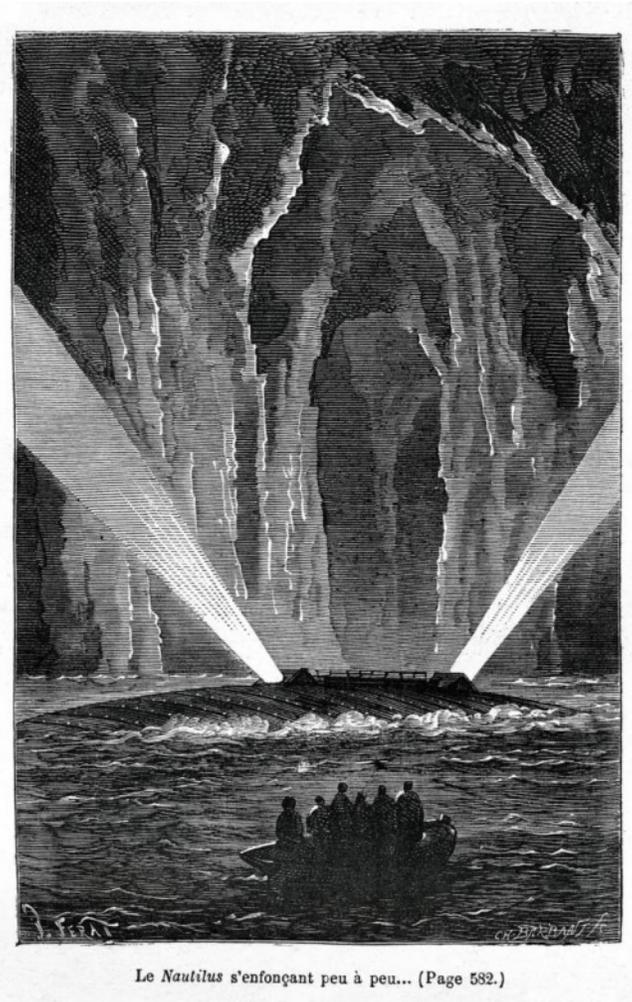
Christian von Hirschhausen, Lukas Barner,
Mario Kendzioriski und Enno Wiebrow, et al.

Abschlussworkshop MODEZEEN| 28. November 2023



- 1. Technikhistorische Einleitung**
- 2. Institutionenökonomischer Ansatz: Systemgüteranalyse potenzieller Wasserstoffwirtschaft(en)**
- 3. Fallstudie: Rügen-Mukran vs. Greifswald-Lubmin**

1874 - Wasserstoff bei Jules Verne



„Wasser ist die Kohle der Zukunft. Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.“ Cyrus Smith

Jules Vernes 1874. „Die geheimnisvolle Insel“

Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/Île_Mysterieuse_02.jpg

Quelle: <https://www.sueddeutsche.de/leben/nautilus-wasserstoff-jules-verne-nemo-1.5851603>

Nach 1945 - Am Scheideweg zwischen Atom- und Solarwirtschaft



Quelle: Hülser und Stokes 2018

Abbildung: Das Hülser Wasserstoffnetz in den 1960er Jahren

- Große Ausbaupläne „Kernkraft oder Solar“

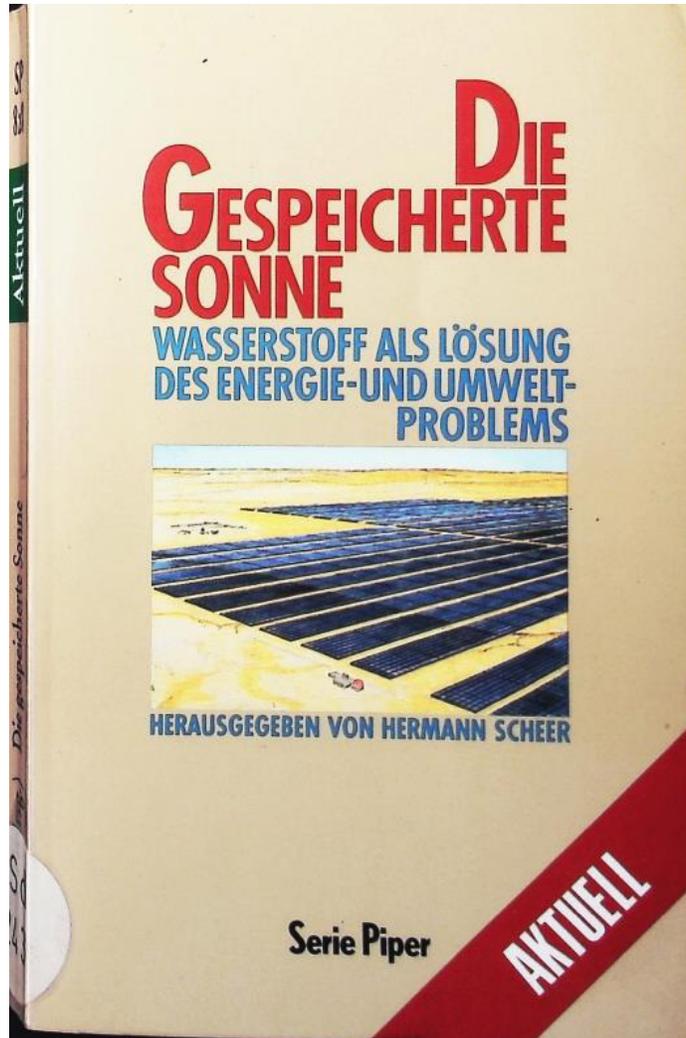
Scheer 1987, 9-10

De facto: Dezentrale (Netz-)Entwicklung

- Transportierbare Druckbehälter
- (pulverisierte) Tankfahrzeuge
- Kleiner Luftzerleger vor Ort
- Dezentrale Leitungsnetze

Banken und Stokes 2018

1980er - „Wasserstoff als Lösung des Energie- und Umweltproblems“



„wenn Wasserstoff mit Hilfe einer regenerativen Energie produziert wird, dessen Einsatz keine Umweltschäden hervorruft und die als Rohstoff kostenlos und unbegrenzt vorhanden ist, kann man von einer „Energierévolution“ sprechen. [...] Da es hier um die realistische Chance zur ökologischen Rettung des Erdballs geht, müssen wir ohne weiteres Zögern den Weg zu einer solaren Wasserstoffwirtschaft einschlagen,“

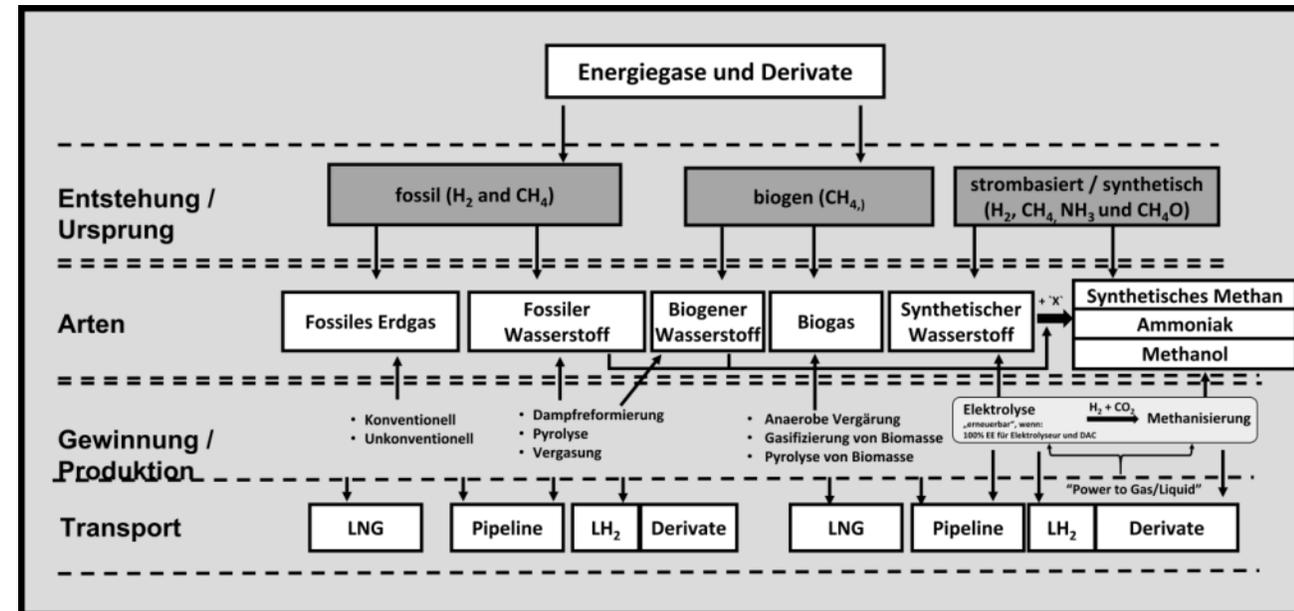
Scheer 1987, 12-13

Quelle:
https://www.zvab.com/servlet/BookDetailsPL?bi=31333537576&searchurl=sortby%3D20%26tn%3Dgespeicherte%2Bsonne%2Bwasserstoff%2Bl%25F6sung&cm_sp=snippet-_-sales1-_-click1#&gid=1&pid=1

Seit ca. 2020 – Mögliche „Renaissance“ der Erwartung einer Wasserstoffwirtschaft



- Im Kontext der Klimakrise als „Erneuerbarer Brennstoff“ Hirschhausen et al. 2022
- Wasserstoffstrategie der Bundesregierung und Fortanschreibung Die Bundesregierung 2020; BMWK 2023
 - Planung (zentralisierter und dezentraler) Infrastruktur
 - Alle Arten von Wasserstoff



Quelle: https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=2;
https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1

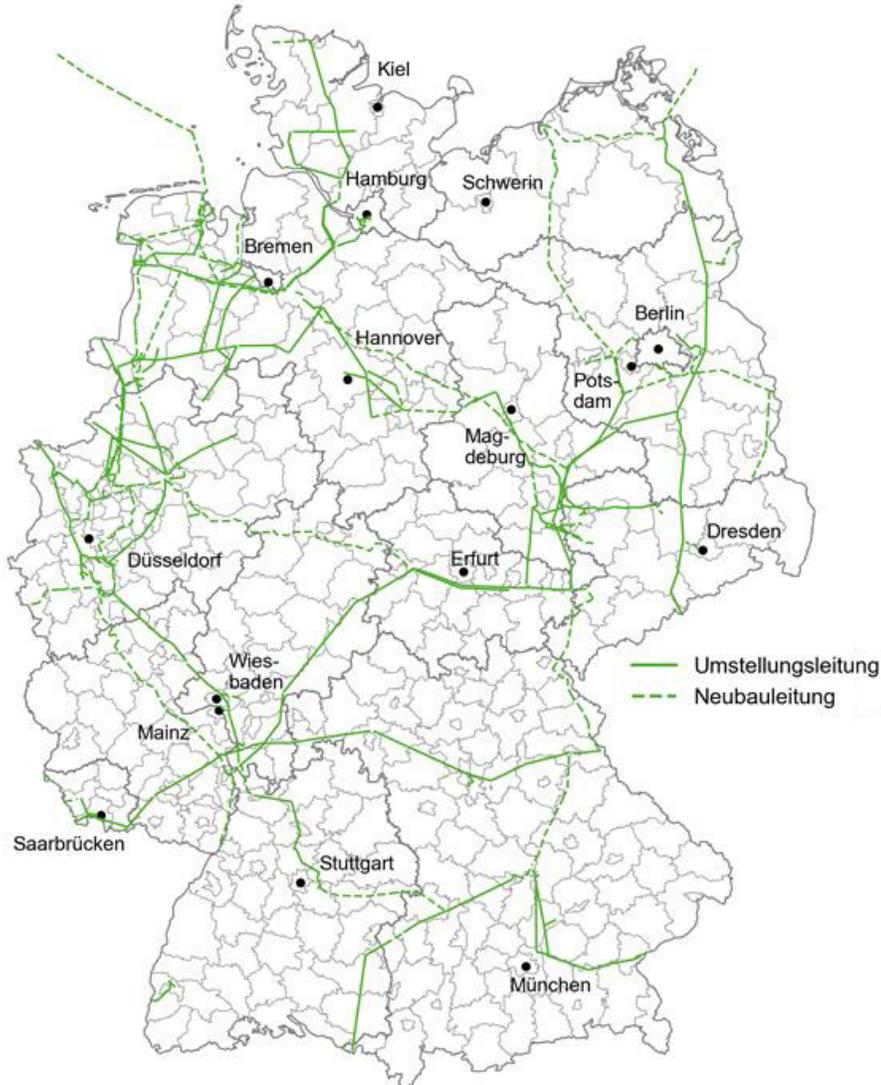
Seit ca. 2020 – Mögliche „Renaissance“ der Erwartung einer Wasserstoffwirtschaft



- 15.11.2023: Vorstellung Entwurf Wasserstoffkernnetz der FNB Gas e.V. FNB Gas 2023b

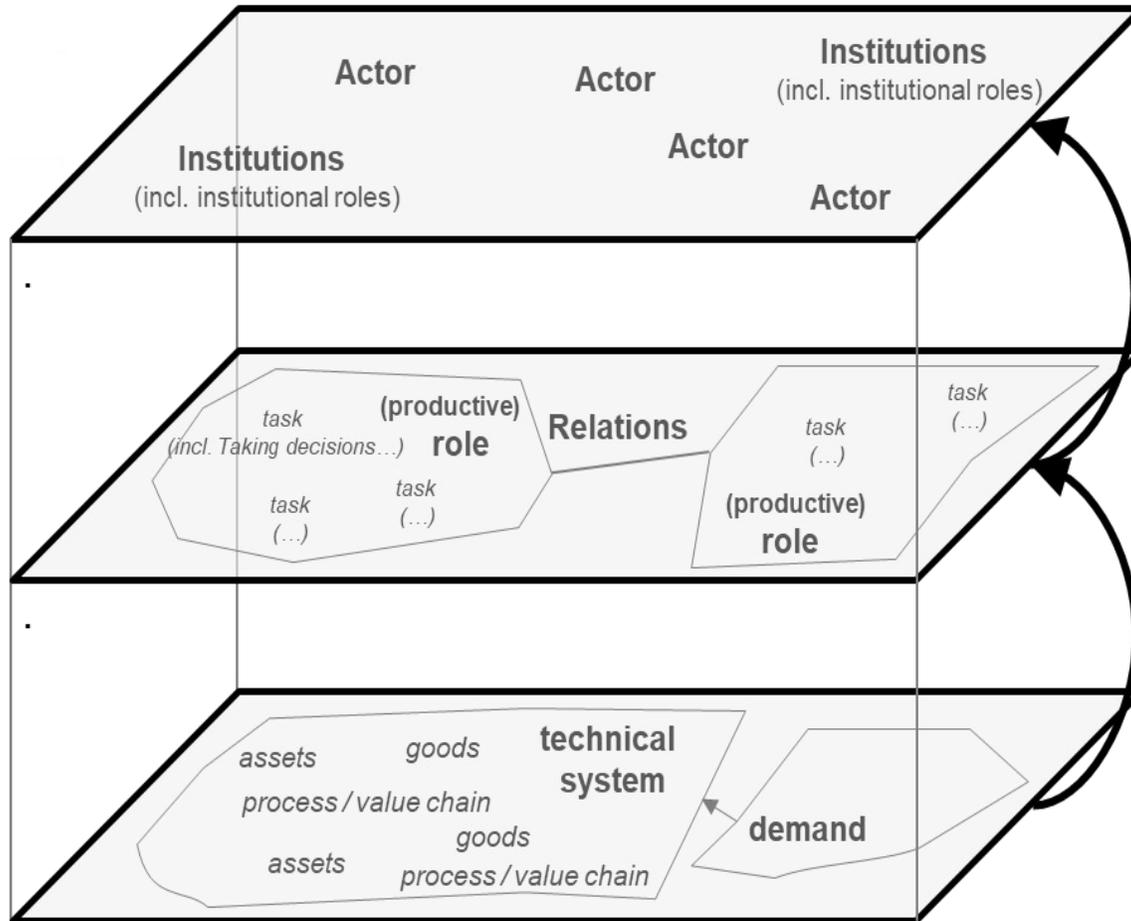
- Szenario-Kriterien zur Operationalisierung festgelegt durch BMWK, BNetzA, BKAmT, BMF, FNB Gas und BDEW FNB Gas 2023a
- Ausgangsbasis für Szenario war Ergebnis der Marktabfrage WE aus NEP 2022-2023
- 9700 km Leitung
- Einspeise- bzw. Ausspeiseleistung 100 GW bzw. 87 GW

- Weiterer Schritt: NEP für Übertragungsleitungen



Quelle: <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/>

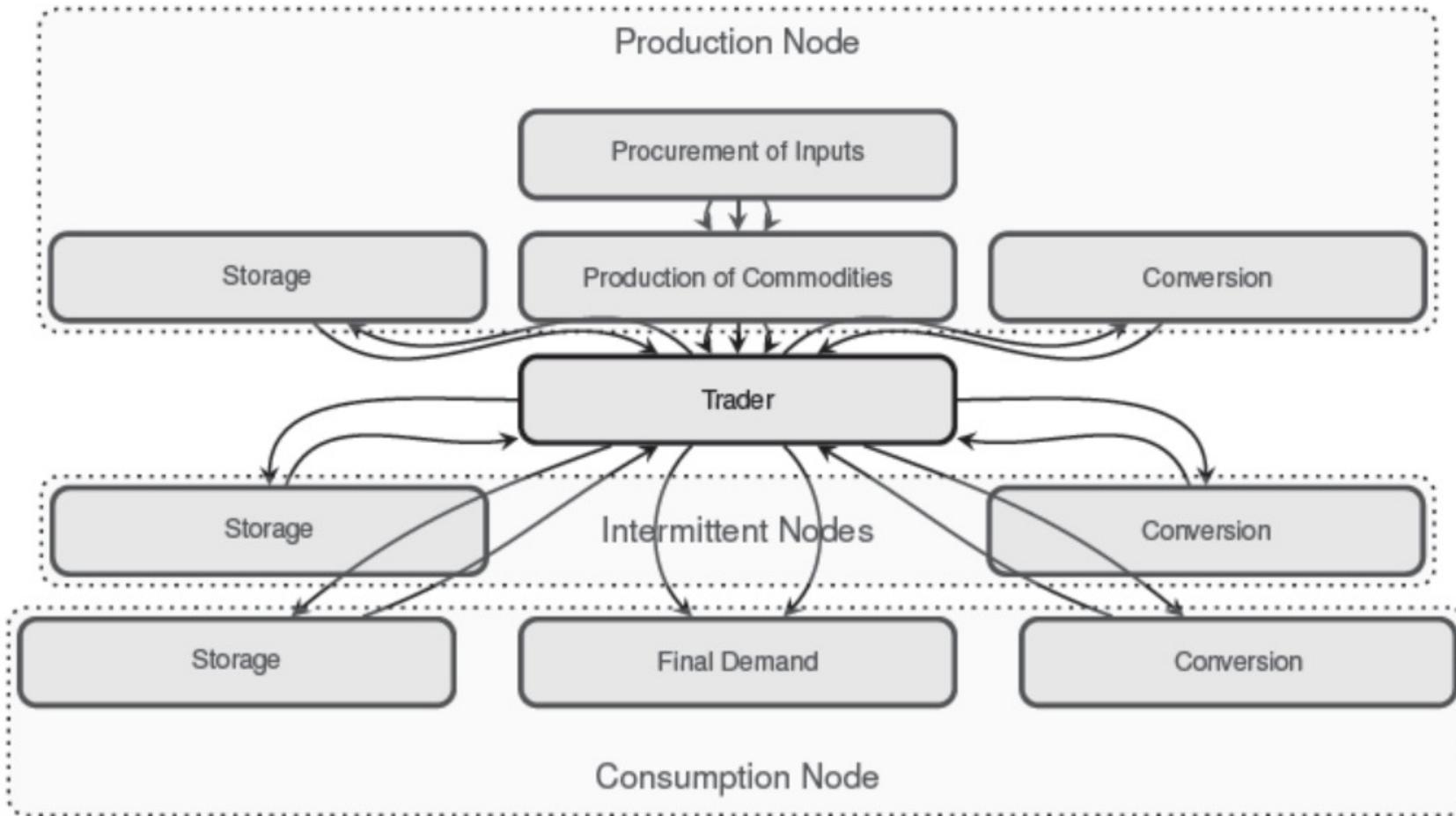
Systemgüteranalyse potenzieller Wasserstoffwirtschaft(-en)



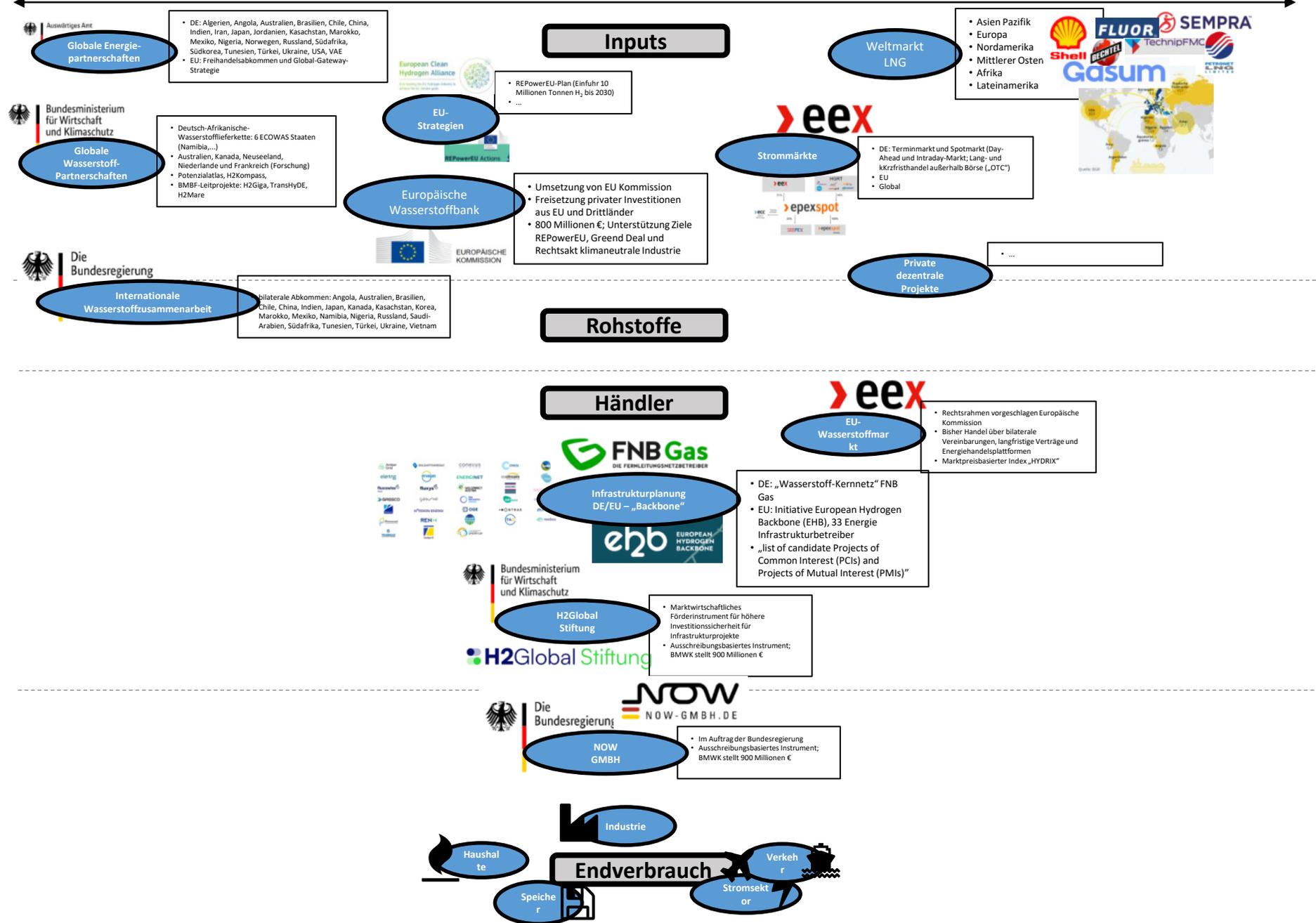
1. Technisches System
2. Akteure Rollen und Beziehungen
3. Institutionen und Organisationsmodelle

Beckers, Gizzi, und Jäkel 2012

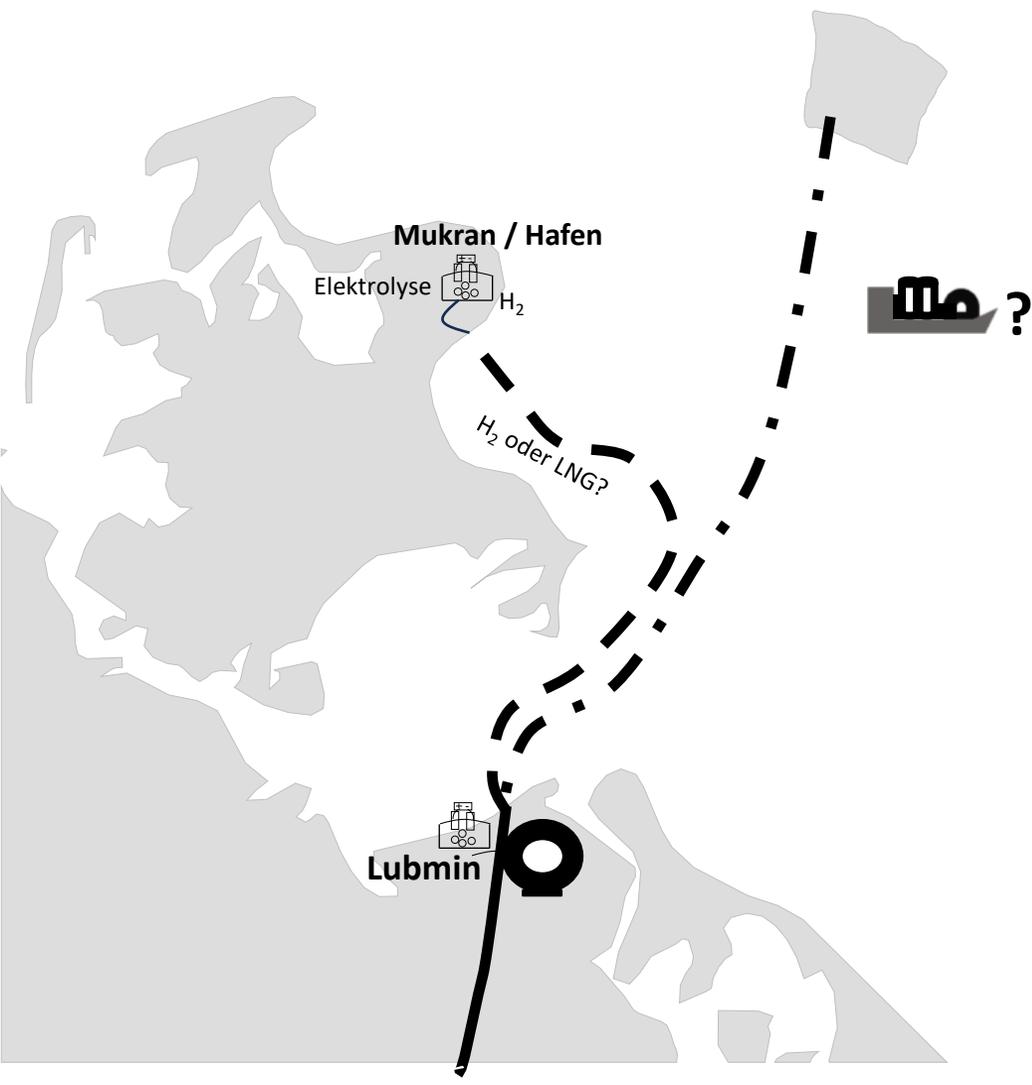
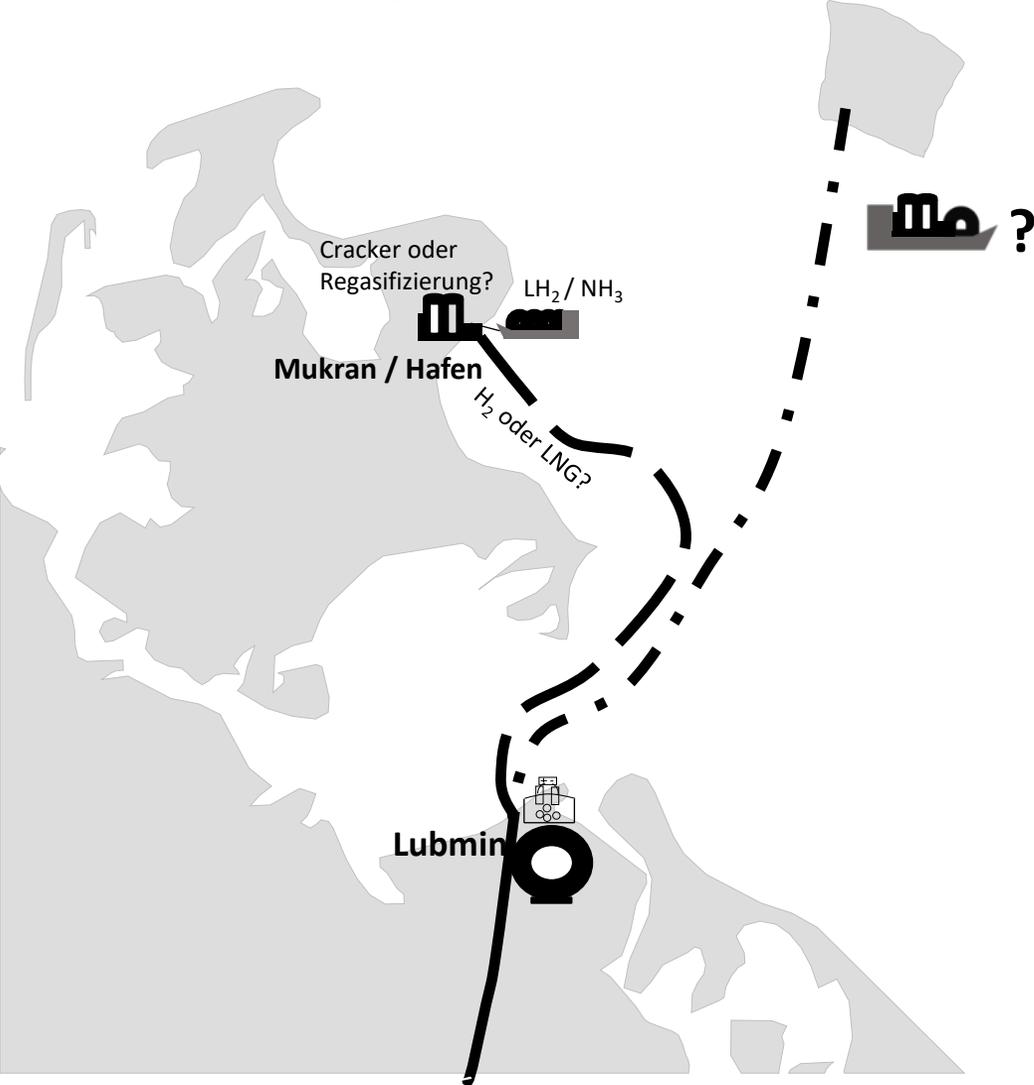
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Beckers, Gizzi, und Jäkel 2012



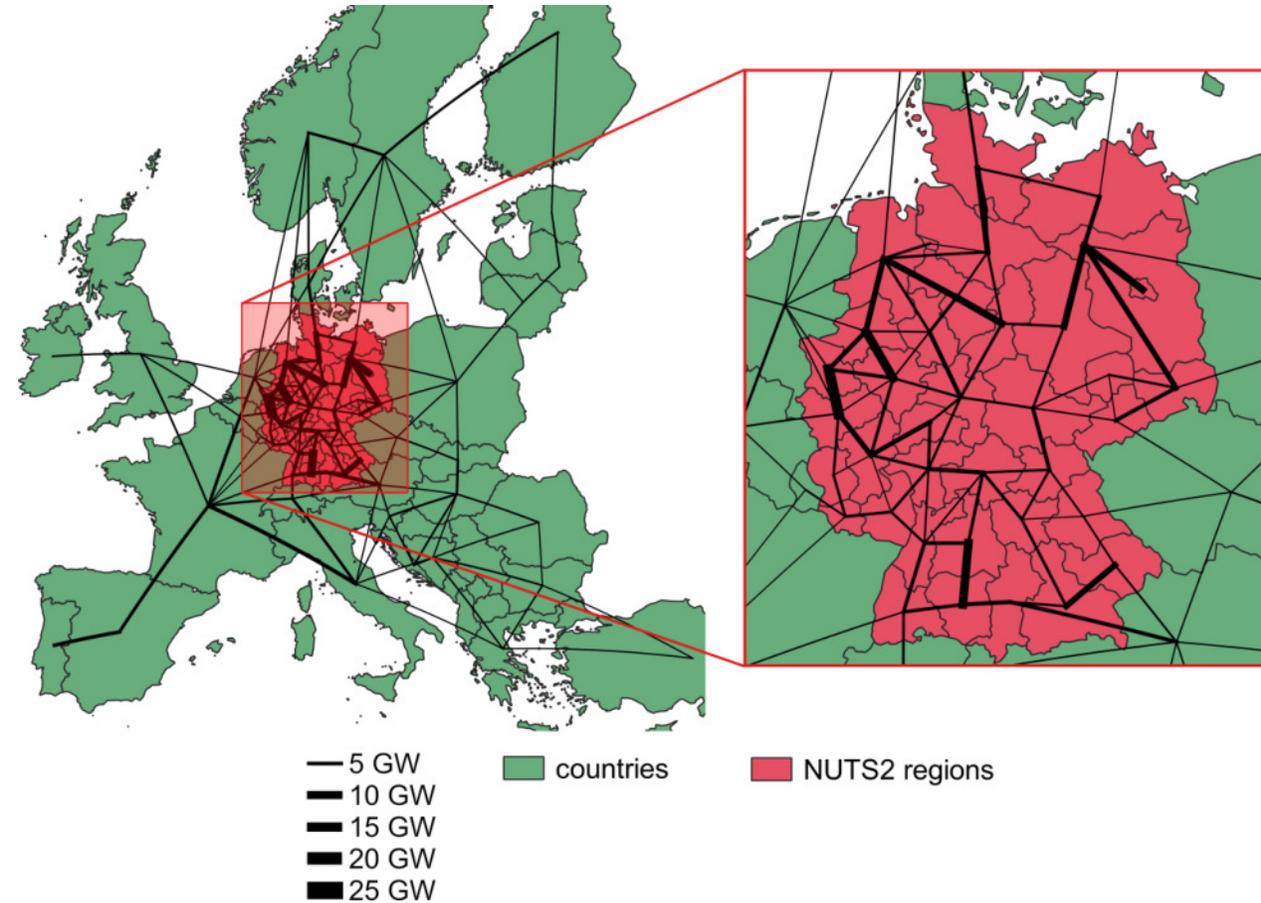
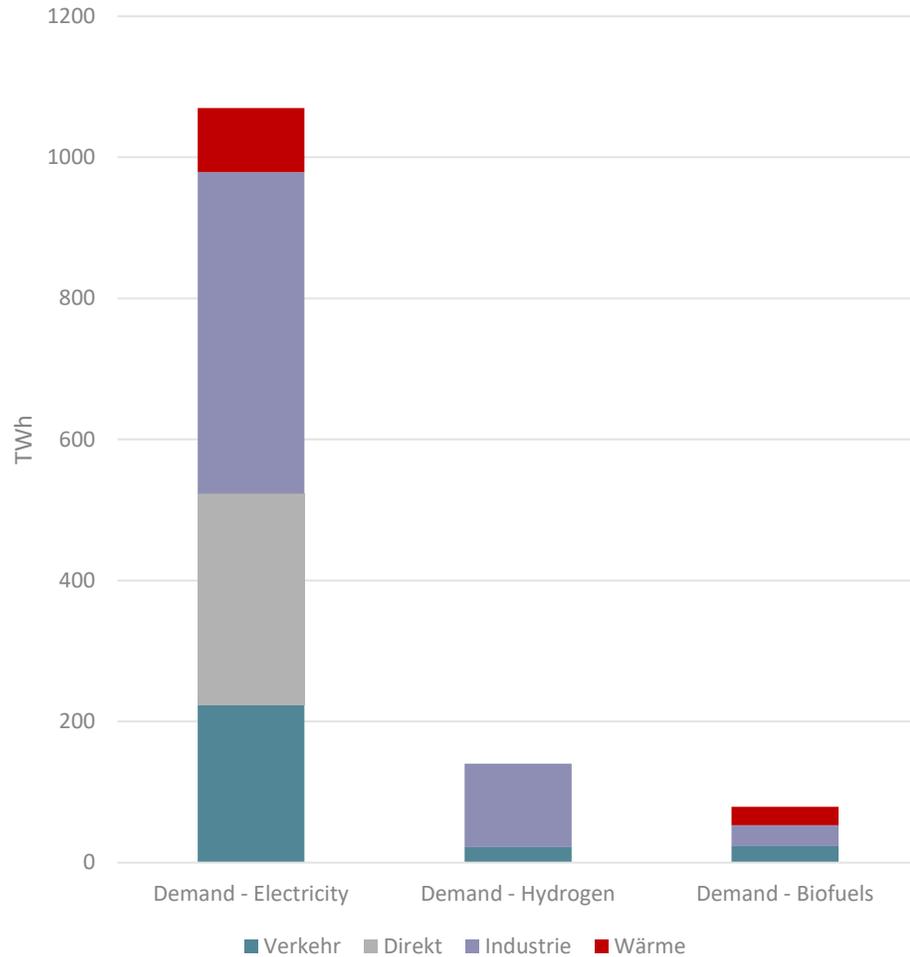
Barner 2023 (in Vorbereitung)



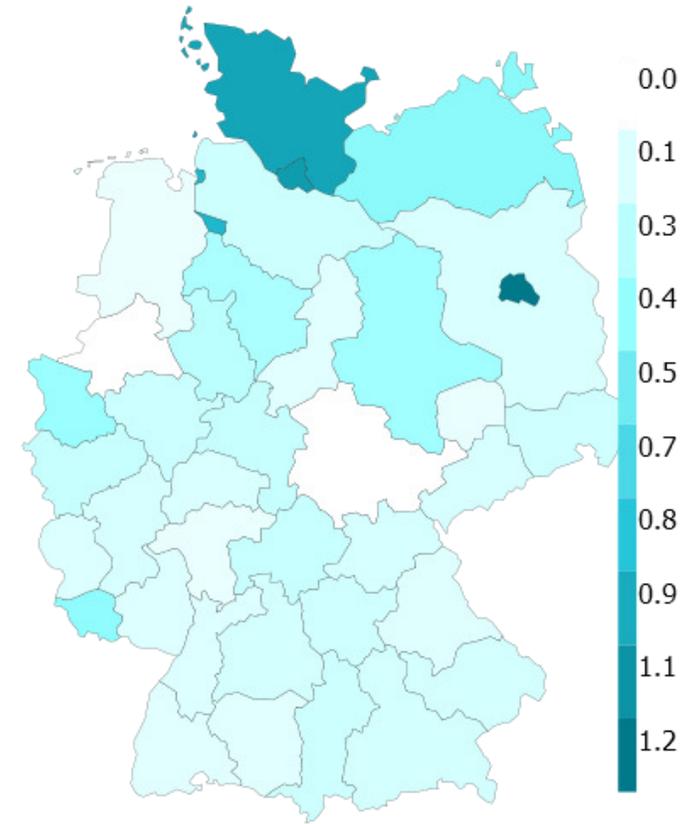
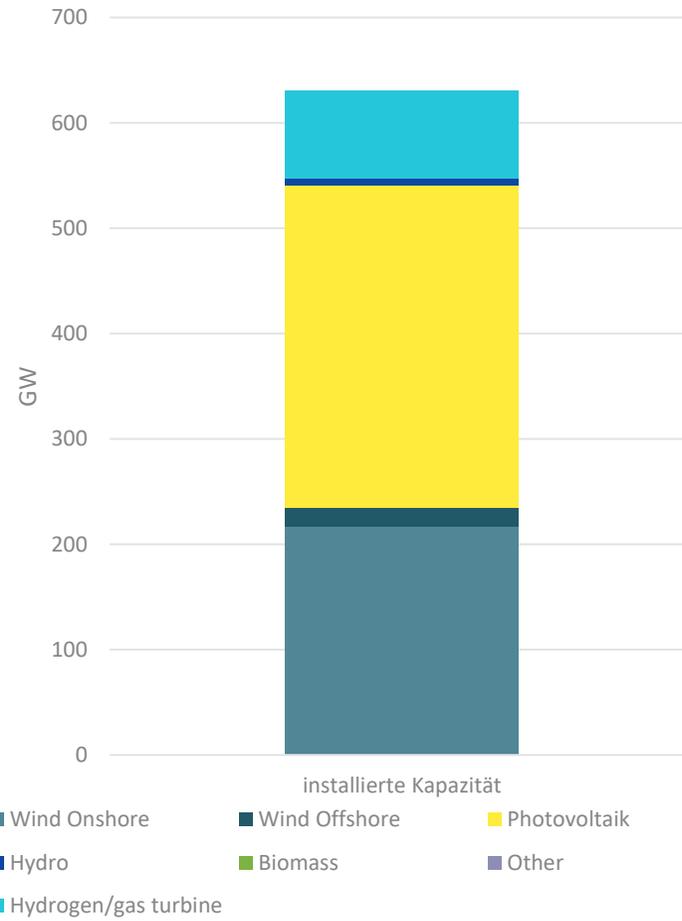
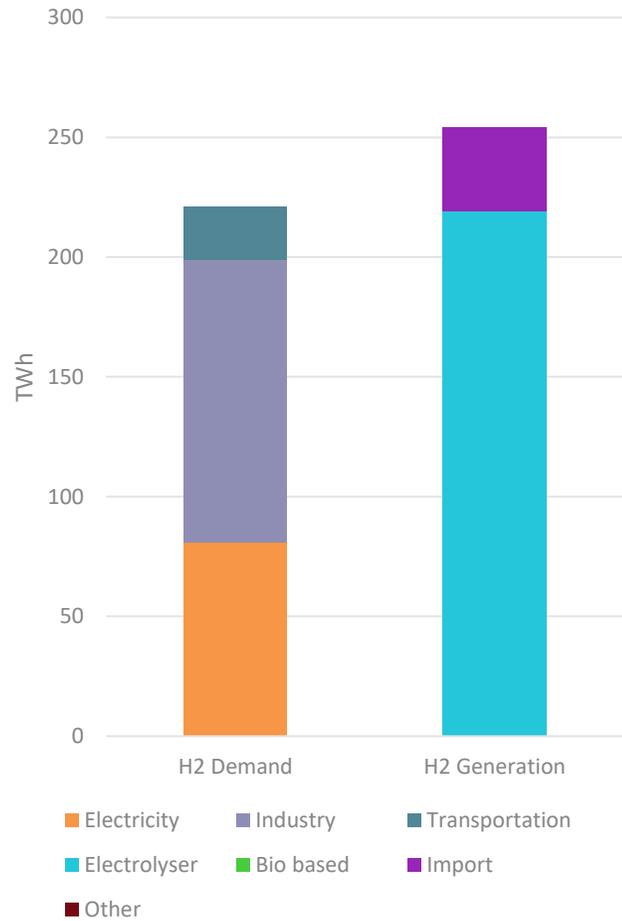
Fallstudie: Rügen-Mukran vs. Greifswald-Lubmin – verschiedene Erzählungen



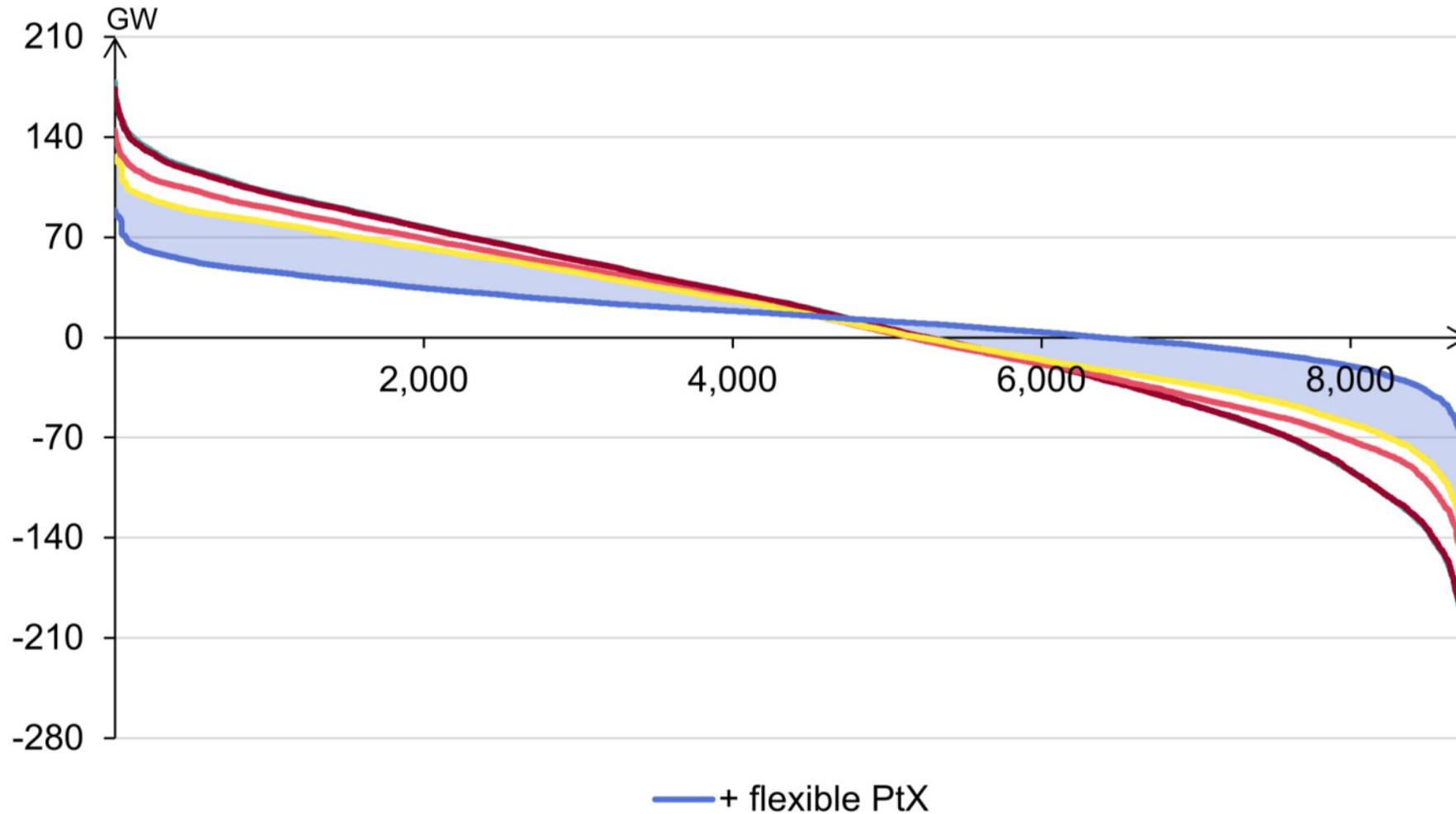
Dezentrales erneuerbares Energiesystem



Dezentrales erneuerbares Energiesystem



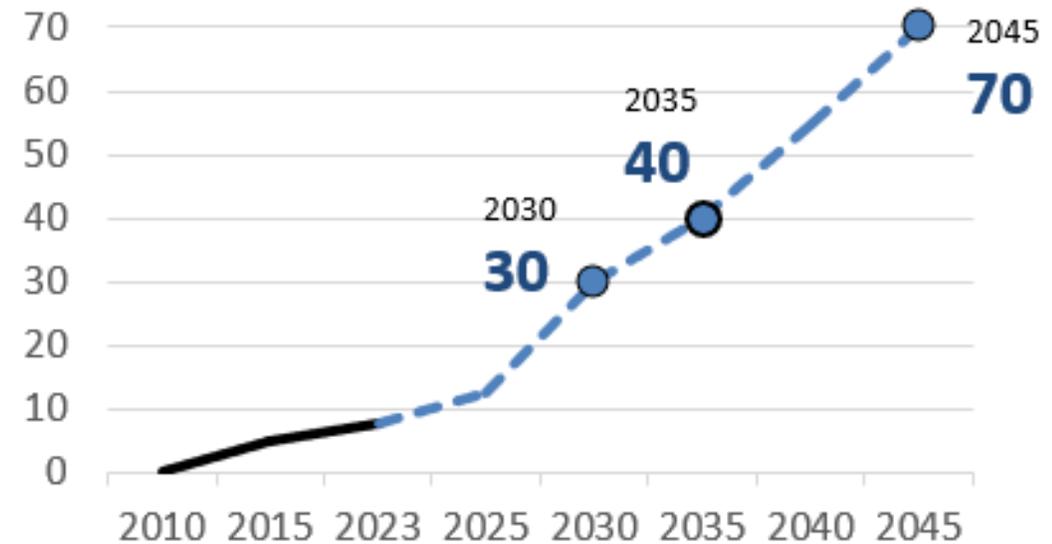
Dezentrales erneuerbares Energiesystem



Motivation



- Greenhouse gas neutrality target by 2045 & coal phase-out by 2038 at the latest.
- Easter package: 115 GW onshore wind & 215 GW PV by 2030.
- Offshore wind expansion targets:
 - 30 GW installed capacity by 2030
 - 40 GW installed capacity by 2035
 - 70 GW installed capacity by 2045



→ Hydrogen?

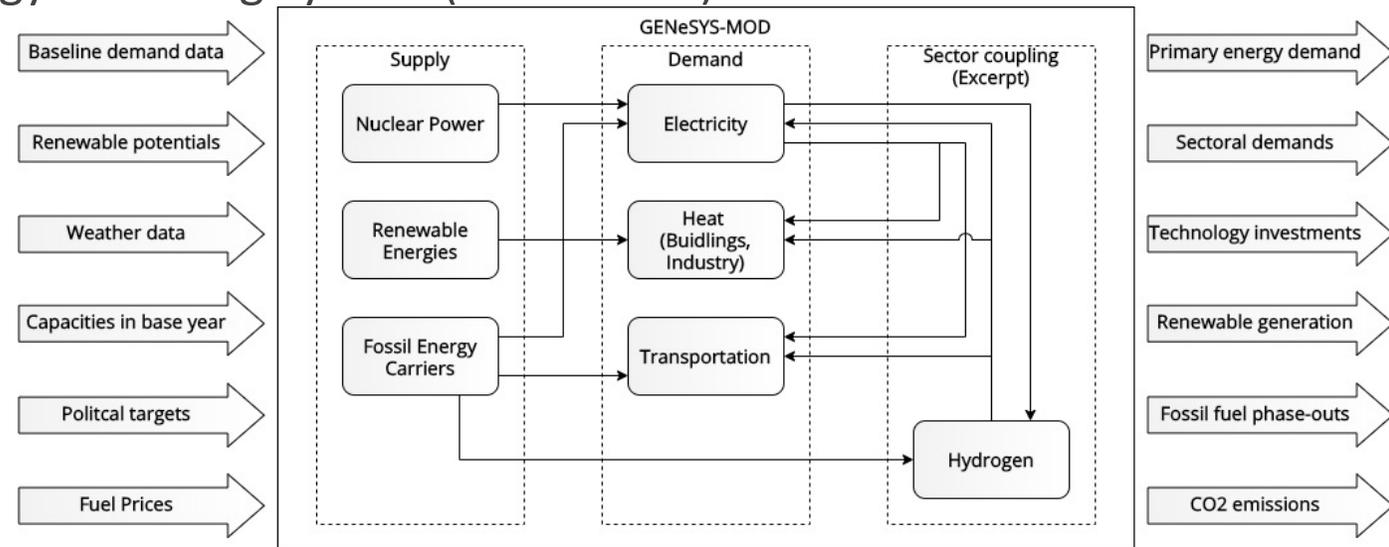
→ Electrification & deployment of sector coupling technologies

→ What will the German energy system look like by 2050?

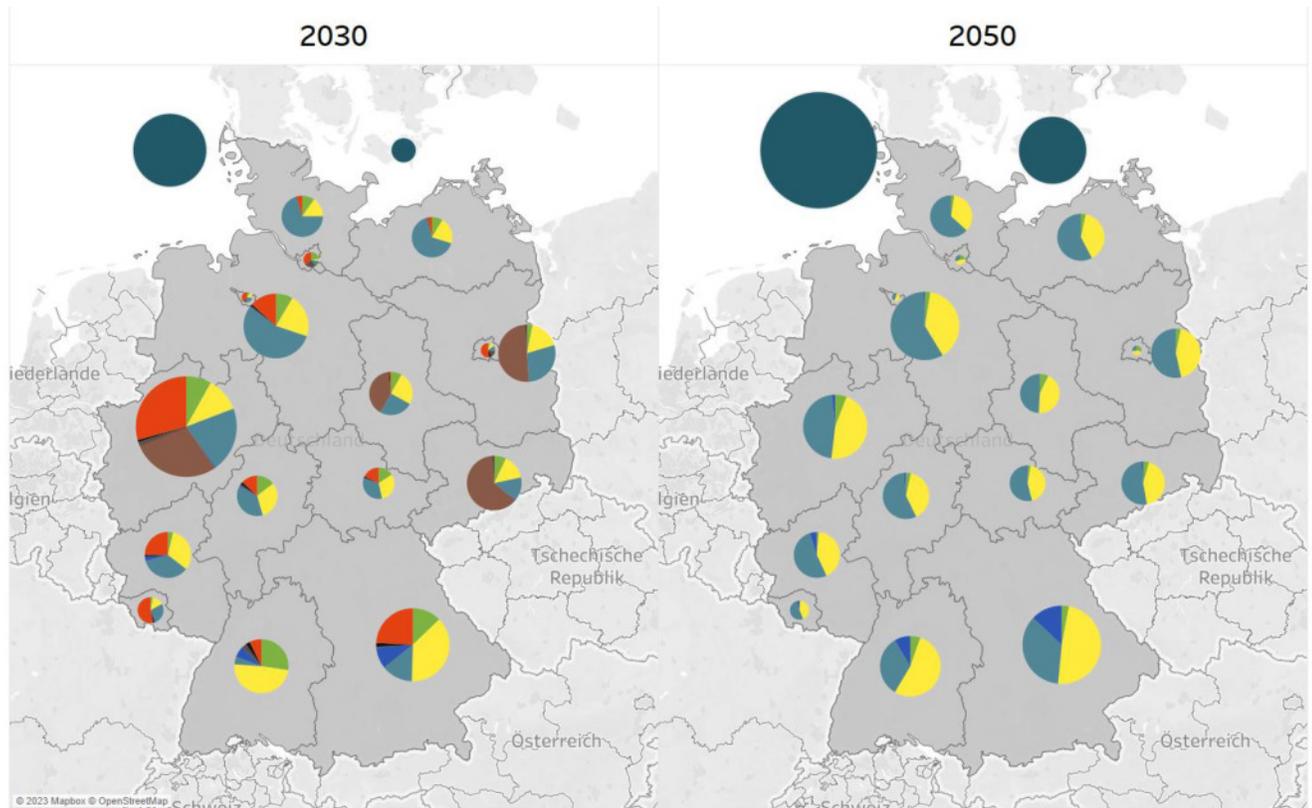
The Global Energy System Model (GENeSYS-MOD) - Overview



- ...is a linear program which optimizes the net present value of a future energy system based on the given assumptions and bounds (cost-optimizing)
- ...includes all the main energy sectors: Power, Heat (Buildings, Industry) and Transportation (frgt & psng)
- ...is publicly available to the community with both code and model data
- ...is based on the Open-Source Energy Modeling System (OSeMOSYS) and enhances the framework with multiple additional features



Preliminary Results 1: Regional Power Production

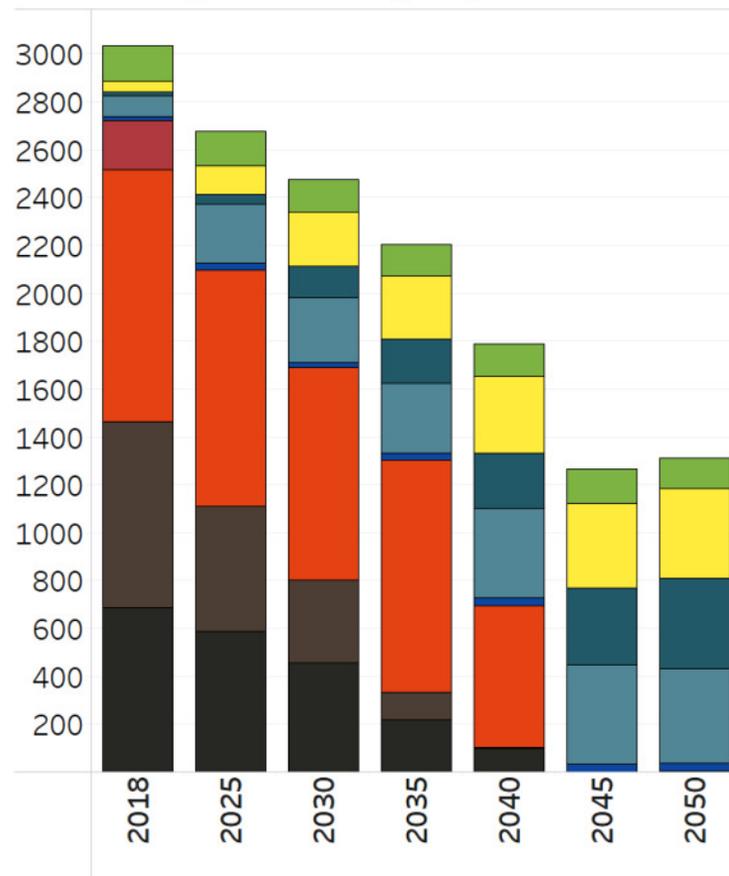


- Decarbonization in all German states to achieve greenhouse gas neutrality by 2045
- Increasing electricity production in North and Baltic Seas
- Wind and solar power meet most of GER's electricity demand

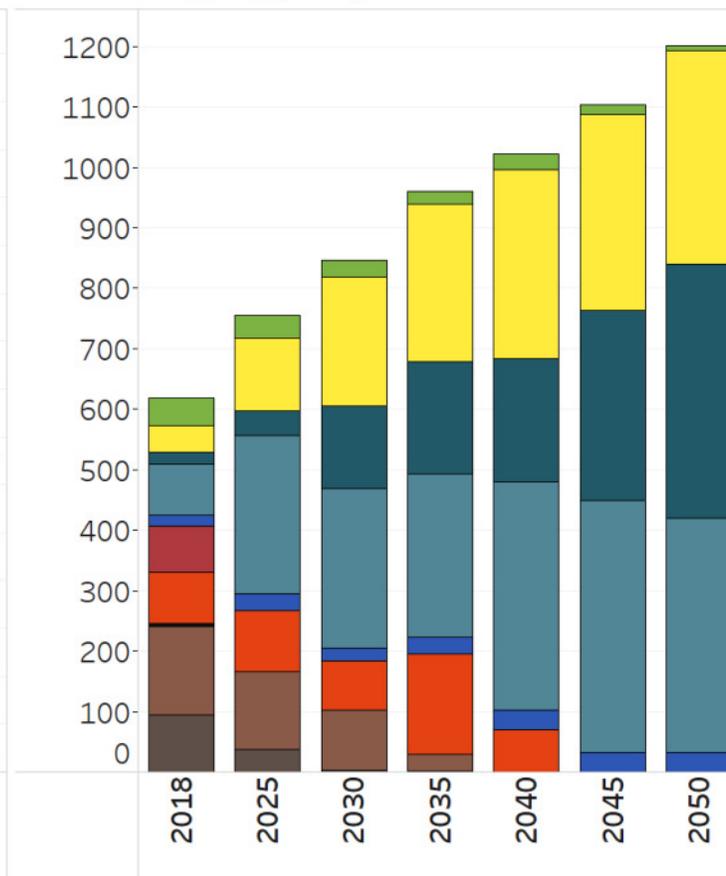
Preliminary Results 2: Primary energy & Electricity Production



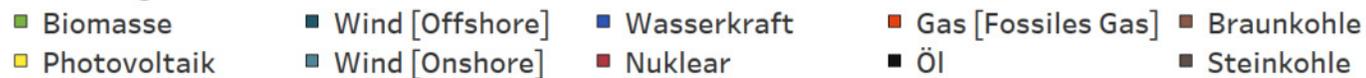
Primärenergieverbrauch [TWh]



Stromerzeugung [TWh]



Technologien

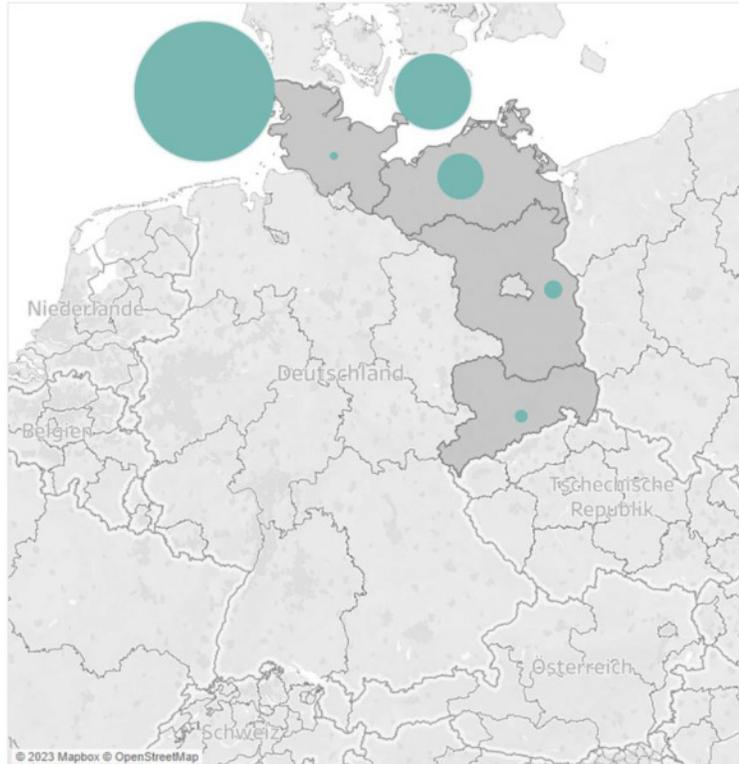


- **Declining primary energy demand by 2050 through energy efficiency**
- **Strong increase in electricity production by 2050 through electrification of all sectors**
- **Renewable energy dominates electricity production from 2030 onwards**

Preliminary Results – Hydrogen Production and Export for a centralized scenario



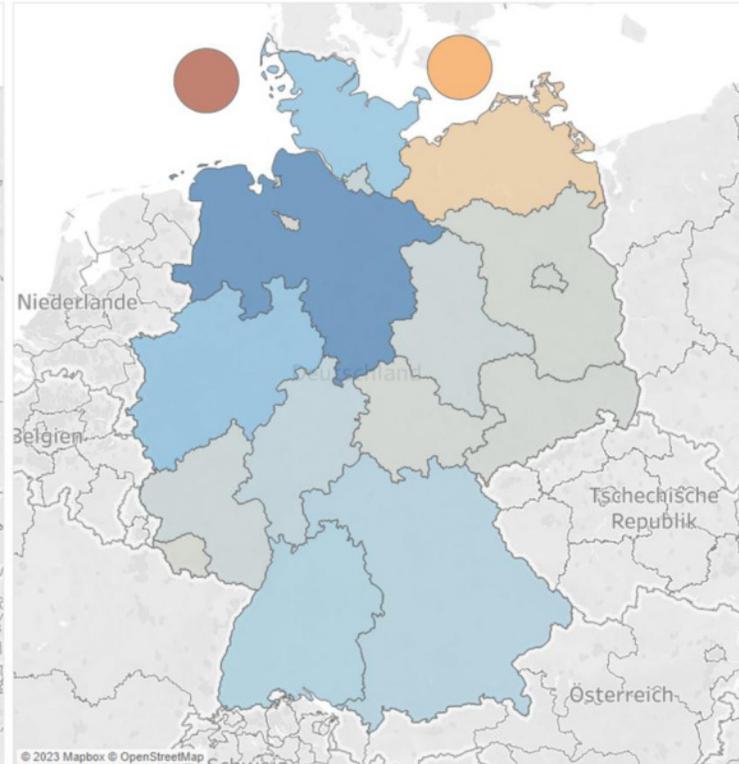
Hydrogen generation 2050



■ Alkaline Electrolysis

TWh • 0,7 ■ 50,0 ■ 100,0

Hydrogen net trade 2050



TWH -198,5 ■ 118,1

■ 150,0 ■ 198,6

- Production dominated by the North and Baltic Sea
- Trading from the north-east into western regions

Banken, Ralf, and Ray Stokes. 2018. “Die Entstehung des Wasserstoff-Pipelinenetzes im Ruhrgebiet 1938-1980.” *Der Anschnitt* 70 (5): 207–2015.

Beckers, Thorsten, Florian Gizzi, and Klaus Jäkel. 2012. “Ein Untersuchungsansatz für Systemgüter: Einordnung, Darstellung, Vorgehen bei der Anwendung.” 2012–01. WIP-Working Paper. Berlin: Technische Universität Berlin.

BMWK. 2023. “Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. NWS 2023.”

Die Bundesregierung. 2020. “Die nationale Wasserstoffstrategie.” Berlin.

FNB Gas. 2023a. “Netzentwicklungsplan Gas 2022–2032. Entwurf.” Entwurf.

———. 2023b. “Entwurf des gemeinsamen Antrags für das Wasserstoff-Kernnetz.”

Kendziorski, Mario, Leonard Göke, Christian von Hirschhausen, Claudia Kemfert, and Elmar Zozmann. 2022. “Centralized and Decentral Approaches to Succeed the 100% Energiewende in Germany in the European Context – A Model-Based Analysis of Generation, Network, and Storage Investments.” *Energy Policy* 167 (August): 113039.

Scheer, Hermann, ed. 1987. *Die gespeicherte Sonne: Wasserstoff als Lösung des Energie- und Umweltproblems*. Orig.-Ausg., 2. Aufl., 8.-13. Tsd. Serie Piper Aktuell, Bd. 828. München: Piper.

Verne, Jules. 1874. *Die geheimnisvolle Insel*. 4. Aufl. in neuer Rechtschreibung. Vol. Nachdruck 1999. Arena-Taschenbuch 260. Würzburg: Arena.

von Hirschhausen, Christian, Claudia Kemfert, and Fabian Praeger. 2022. “Fossil Natural Gas Exit – A New Narrative for the European Energy Transformation Towards Decarbonization.” *Economics of Energy & Environmental Policy* 10 (2).



operations research
QUANTITATIVE INFRASTRUCTURE SYSTEM MODELING

Ein partielles Marktgleichgewichtsmodell für den globalen Wasserstoffhandel **Modellierung einer zentralen Perspektive auf globale Wasserstoffmärkte**

Lukas Barner

✉ lb@wip.tu-berlin.de

MODEZEEN Abschlussworkshop

Dresden, 28. November, 2023

Technische Universität Berlin – Workgroup for Infrastructure Policy (WIP)
DIW Berlin

1. Motivation

2. Modell Überblick

3. Mathematische Formulierung

4. Daten

5. Vorläufige Ergebnisse

6. Fazit und Ausblick

7. Diskussion

8. Referenzen

Motivation

- ▶ Die genauen Charakteristika des Markthochlaufs von Wasserstoff sind von starken Pfadabhängigkeiten geprägt:
 - ▷ Ausmaß der Dekarbonisierung (100% vs Populismus)
 - ▷ Zentrale oder dezentrale Transformationsansätze
 - ▷ Unsicherheiten bei Entwicklung einzelner Technologien, learning curves
- ▶ Aktuell bestimmt eine zentralisierte Entwicklungsstrategie den Diskurs (BMWK 2023)
- ▶ In diesem Fall erscheint die Bildung von vollständig wettbewerblichen Preisen insbesondere in der Markthochlaufphase unrealistisch (analog zu Märkten für Erdgas):
 - ▷ Inelastische Nachfrage (?/+)
 - ▷ Kapitalintensität (++)
 - ▷ Wenige Exporteure (?)
 - ▷ Global divergierende Bereitstellungskosten (++)
- ▶ Die meisten Studien sind techno-ökonomischer Natur (Kostenminimierung oder Analyse einzelner Handelsrouten)
- ▶ Berücksichtigung strategischen Akteursverhaltens weitestgehend unberücksichtigt

Agenda

1. Motivation

2. Modell Überblick

3. Mathematische Formulierung

4. Daten

5. Vorläufige Ergebnisse

6. Fazit und Ausblick

7. Diskussion

8. Referenzen

Modell Überblick

- ▶ Wasserstoff muss sektorübergreifend gedacht werden
- ▶ Interaktion mit:
 - ▷ Strommarkt
 - » Erneuerbare Energien
 - » Atomkraft ?
 - ▷ Märkte für Erdgas
 - » Konventionelle Wasserstoffproduktion
 - » CCTS ?
 - ▷ Andere commodity markets
 - » Ammoniak
 - » Methanol

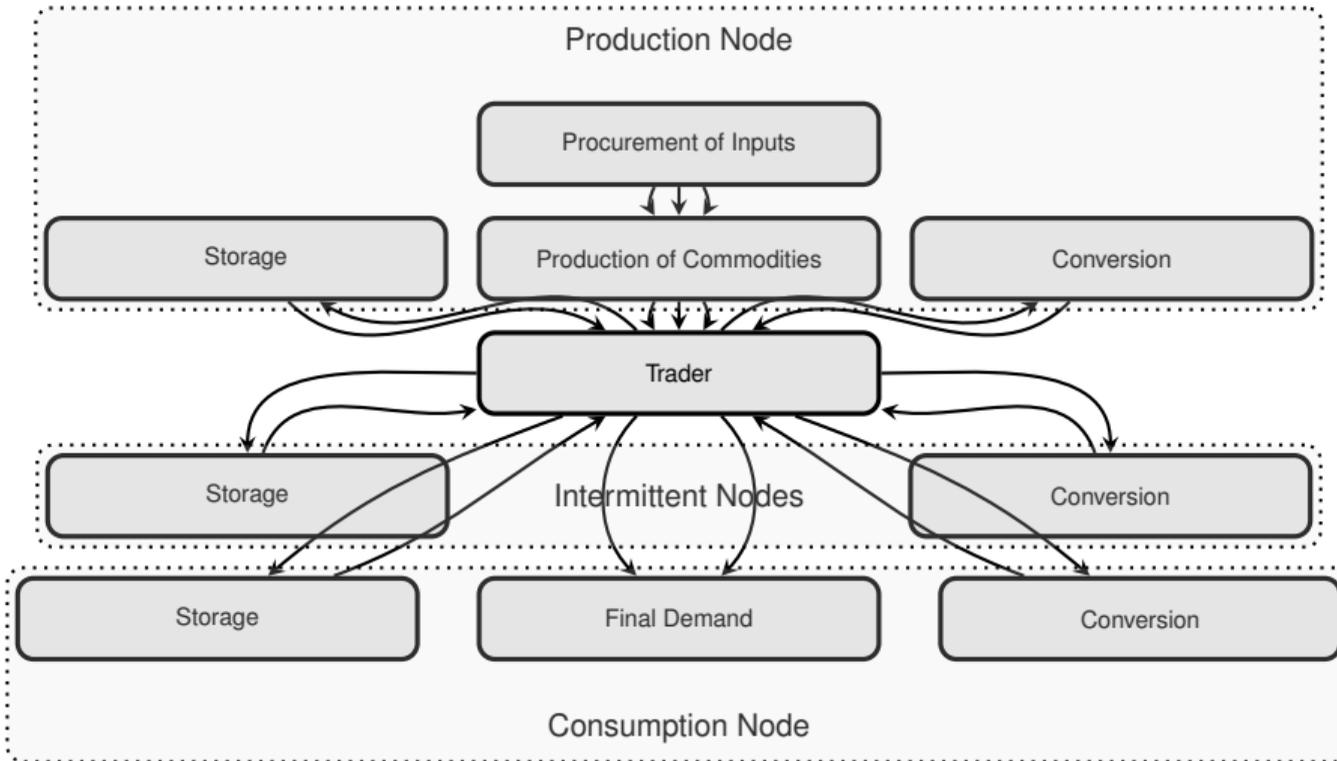


Abbildung: Struktureller Modellüberblick.

1. Motivation

2. Modell Überblick

3. Mathematische Formulierung

4. Daten

5. Vorläufige Ergebnisse

6. Fazit und Ausblick

7. Diskussion

8. Referenzen

Agenda

1. Motivation

2. Modell Überblick

3. Mathematische Formulierung

4. Daten

5. Vorläufige Ergebnisse

6. Fazit und Ausblick

7. Diskussion

8. Referenzen

Exemplarisch: Renewable Procurement Curves

- ▶ GIS Analyse
 - ▷ GlobalEnergyGIS zur Berechnung nodaler Potentiale für erneuerbare Energien
 - ▷ Basierend auf historischen Wetterdaten des ERA5 data set (2018)
 - ▷ Modellregionen werden aggregiert und Potenziale, sowie stündliche Kapazitätsfaktoren werden generiert
 - ▷ Ausschluss von geschützten oder schwer zu bebauenden Regionen
- ▶ Domestische Stromnachfrage
 - ▷ Synthetische Stromnachfrage für zukünftige Jahre via GlobalEnergyGIS
- ▶ Berechnung von Stromgestehungskosten
 - ▷ Potentiale, stündliche Kapazitätsfaktoren
- ▶ Wasserstoffbereitstellungskosten
 - ▷ Inkl. CAPEX/OPEX für Elektrolyseure
- ▶ Zugrundelegung von residualem Stromangebot
 - ▷ Domestische Versorgung aus 100% erneuerbaren Energien bevor Wasserstoff für den Export produziert werden kann
 - ▷ Eigenes Optimierungsmodell, ohne grenzüberschreitende Stromtransfers
- ▶ Residuale Angebotskurven für Wasserstoff
 - ▷ Residualpotential anhand der Wasserstoffbereitstellungskosten
 - ▷ Günstigste Stromquelle \neq Günstigste Wasserstoffquelle
 - ▷ Unterschiedliche Volllaststunden Elektrolyseure

Agenda

1. Motivation

2. Modell Überblick

3. Mathematische Formulierung

4. Daten

5. Vorläufige Ergebnisse

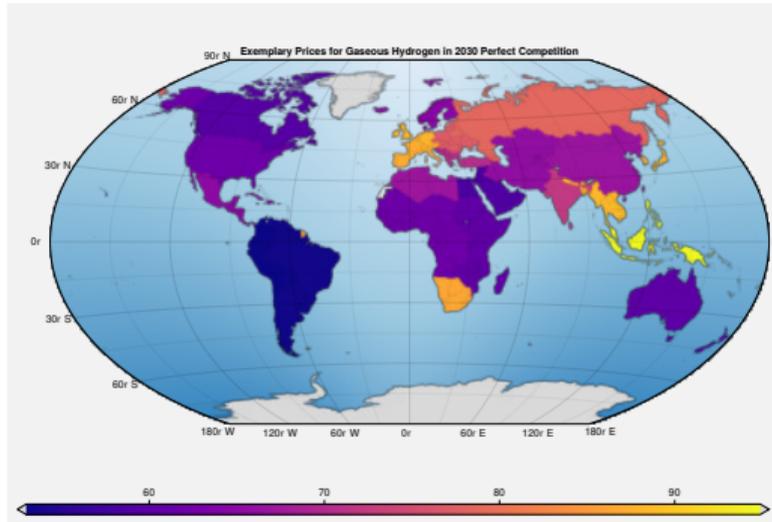
6. Fazit und Ausblick

7. Diskussion

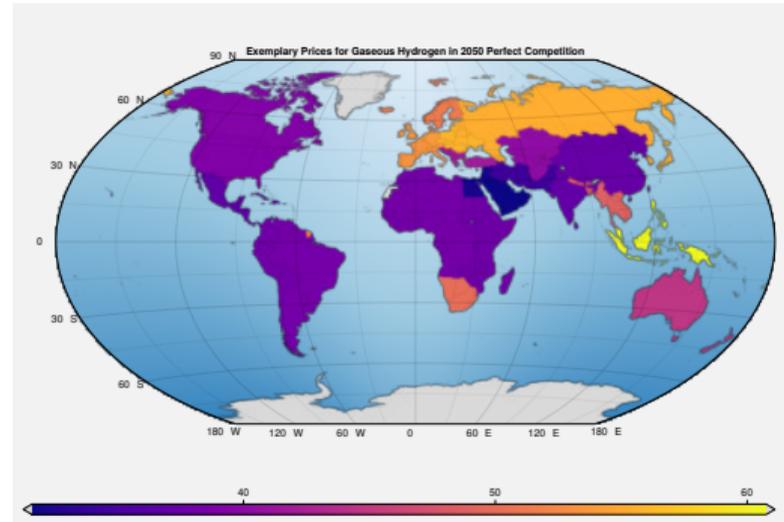
8. Referenzen

Einfache Case Study

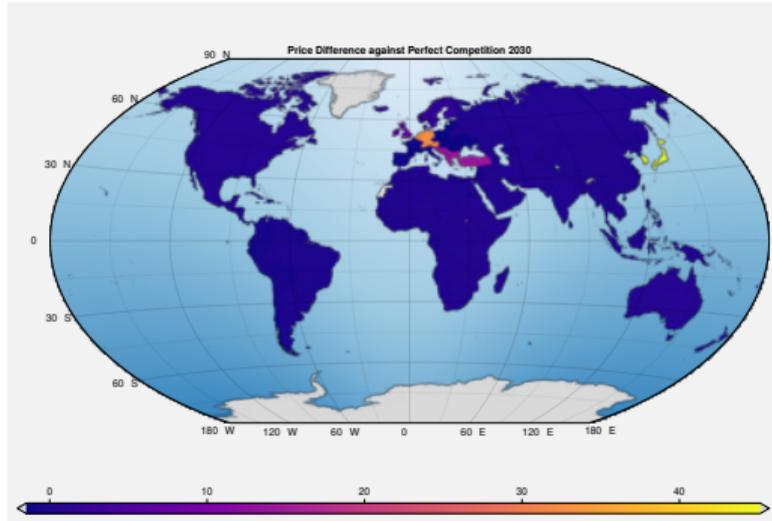
- ▶ Inverse Nachfragekurven für Ammoniak und Wasserstoff
- ▶ Nachfragemengen grob kalibriert auf Gesamtnachfrage des World Energy Outlook 2022 IEA (NZE 2022)
- ▶ Bereitstellung von Strom ausschließlich über erneuerbare Energien
- ▶ Transport via Ammoniak, sowie flüssigem und gasförmigem Wasserstoff
- ▶ Optimistisches Szenario bzgl.:
 - ▷ Investmentkosten für erneuerbare Energien
 - ▷ Kostenentwicklung für Elektrolyseure
- ▶ Domestisch vollständig wettbewerbliche Trader
- ▶ Aber Möglichkeit zur strategischen Beeinflussung von Preisen bei Exporteuren (Nash-Cournot)



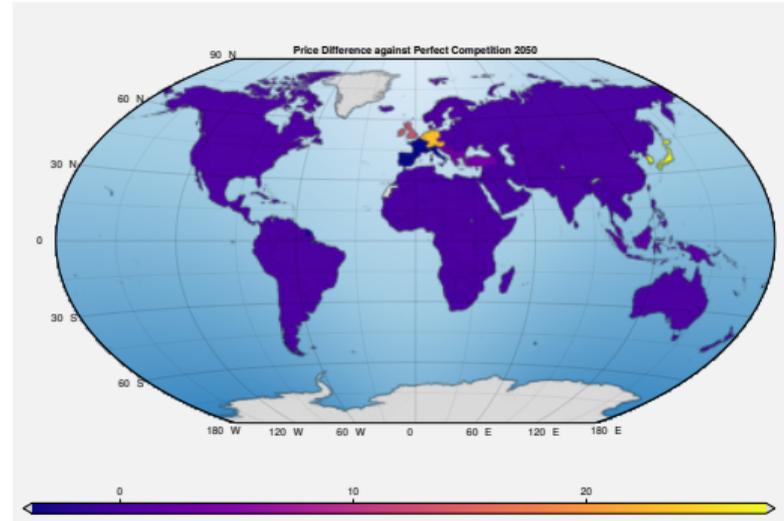
Quelle: Eigene Darstellung, Preise in €/MWh.



Quelle: Eigene Darstellung, Preise in €/MWh.



Quelle: Eigene Darstellung, Preisdifferenzen in €/MWh.



Quelle: Eigene Darstellung, Preisdifferenzen in €/MWh.

Agenda

1. Motivation

2. Modell Überblick

3. Mathematische Formulierung

4. Daten

5. Vorläufige Ergebnisse

6. Fazit und Ausblick

7. Diskussion

8. Referenzen

Fazit

- ▶ Strategisches Verhalten kann relevanten (bisher wenig diskutierten) Effekt auf Marktpreise haben
- ▶ Gilt vorrangig für potentielle Importregionen
- ▶ Pipeline basierter Handel modellseitig favorisiert
 - ▷ Unzureichende Preisdivergenz durch optimistische Kostenentwicklung, Ammoniakpreise konvergent
- ▶ Wasserstoff aus Atomenergie wenig plausibel
 - ▷ Keine Überschusskapazitäten, Neubau kostenseitig nicht konkurrenzfähig
 - ▷ Bekannte Punkte aus dem Strommarkt: Fehlende Nachhaltigkeit, etc.

Ausblick

- ▶ Kalibrierung mit Erdgasmärkten, Ausweitung auf zusätzliche Wasserstoffträger (z.B. Methanol oder LOHC)
- ▶ Weitere Nachschärfung via Modellkopplung möglich (z.B. Energiesystem- oder Strommarktmodelle)
- ▶ Sensitivitätsanalyse, Abzeichnen alternativer Lösungsräume
- ▶ Geopolitik (z.B. China-Japan, Russland und Erdgas)

Agenda

1. Motivation

2. Modell Überblick

3. Mathematische Formulierung

4. Daten

5. Vorläufige Ergebnisse

6. Fazit und Ausblick

7. Diskussion

8. Referenzen

Diskussion

Agenda

1. Motivation

2. Modell Überblick

3. Mathematische Formulierung

4. Daten

5. Vorläufige Ergebnisse

6. Fazit und Ausblick

7. Diskussion

8. Referenzen



BMWK. 2023. **Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. NWS 2023.** 2023.

https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1.



IEA. 2022. **World Energy Outlook 2022.** Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.