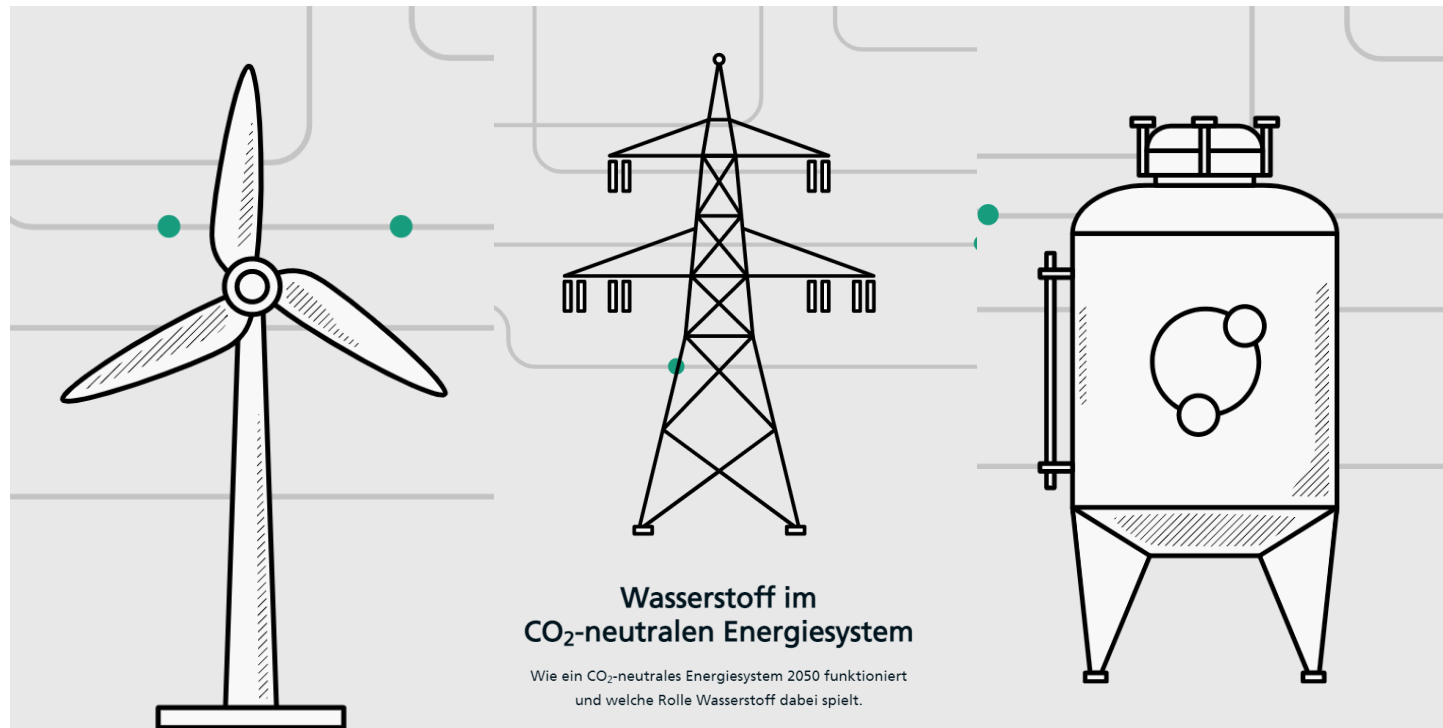


WASSERSTOFF IM CO₂-NEUTRALEN ENERGIESYSTEM

Tobias Fleiter, Richard Schmitz, Charlotte Senkpiel, Markus Haun, Julian Brandes, Marijke Welisch, Christoph Kost, Norman Gerhardt, Marius Neuwirth, Pia Manz, Benjamin Pfluger



CINES Systemanalyse: Institutsübergreifende Kooperation von Fraunhofer Instituten

Grundlage sind die Arbeiten der institutsübergreifenden CINES Systemanalyse, bestehend aus

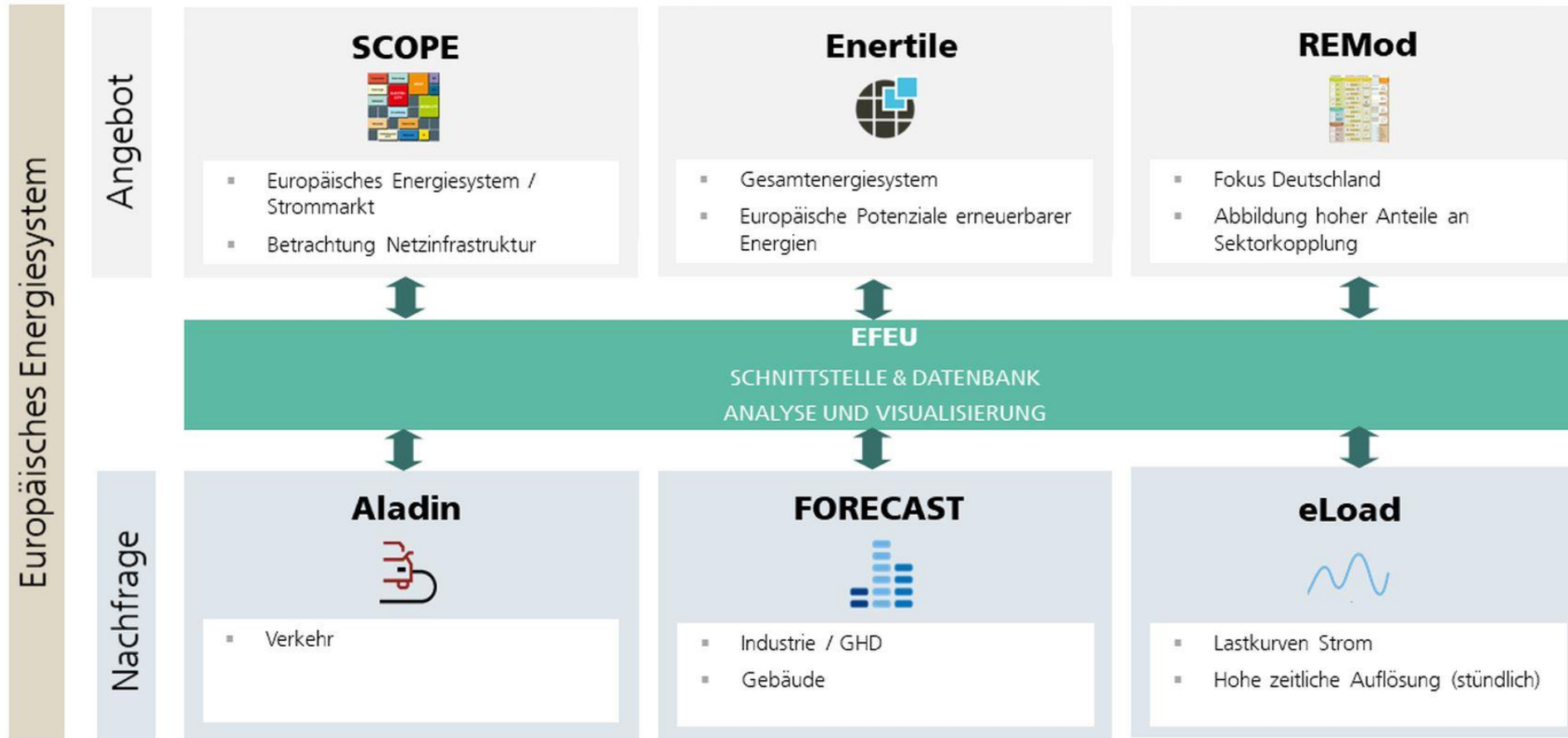
- Fraunhofer ISI,
- Fraunhofer IEE,
- Fraunhofer ISE und
- Fraunhofer IEG.

Die Webseite zur Fraunhofer-Wasserstoff Story soll

- Ergebnisse durchgeführter Systemstudien der beteiligten Fraunhofer Institute bündeln
- Ergebnisse zugänglicher machen und spannender aufbereiten
- Mehr bieten als herkömmliche Projektberichte



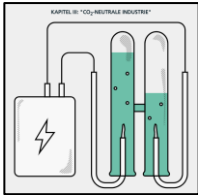
Systemmodellierung von Fraunhofer CINES als Grundlage



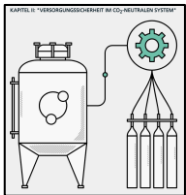
AGENDA



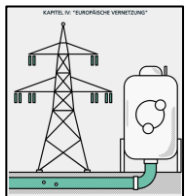
- Charlotte Senkpiel:
Kapitel I: Das Energiesystem im Wandel



- Tobias Fleiter:
Kapitel III: Wasserstoff für die CO2-neutrale Industrie



- Richard Schmitz:
Kapitel II: Versorgungssicherheit im CO2-neutralen System



- Richard Schmitz:
Kapitel IV: Europäische Vernetzung

KAPITEL I: DAS ENERGIESYSTEM IM WANDEL

Kostenoptimale Verwendung von Wasserstoff aus sektorübergreifender Perspektive



Charlotte Senkpiel,
Christoph Kost, Julian Brandes, Markus Haun

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
ISE

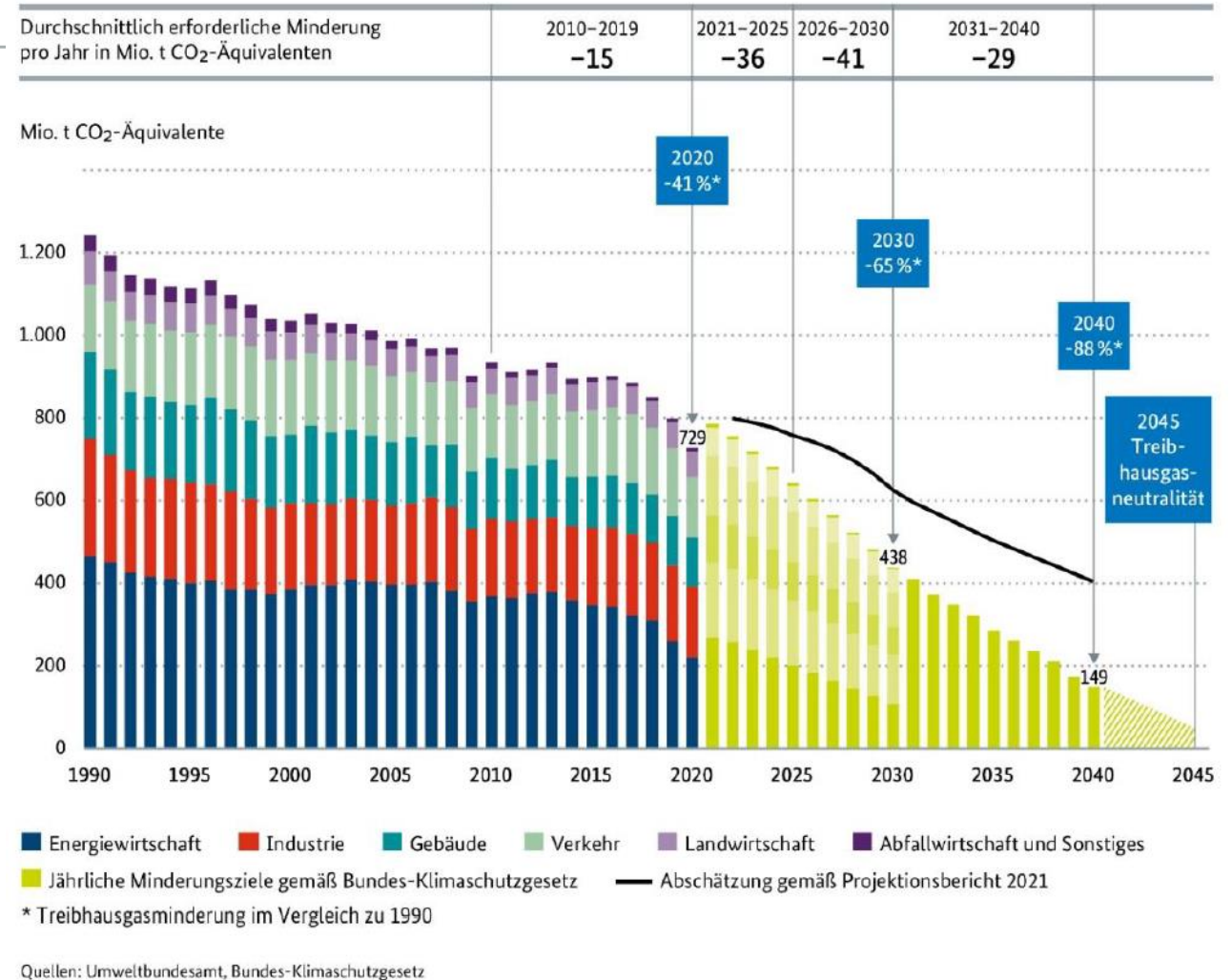
Freiburg, 20. Januar 2022

www.ise.fraunhofer.de

Klimapolitische Ziele

- Das Bundes-Klimaschutzgesetz legt ambitionierte Ziele zur Reduktion der THG-Emissionen fest.
- Unter Einhaltung des THG-Reduktionspfads können Energiesystemmodelle mögliche Transformationspfade bestimmen.
- Prämisse hierfür ist meist das techno-ökonomische Optimum.
- Energiesystemmodelle können damit Orientierungswissen bereitstellen.

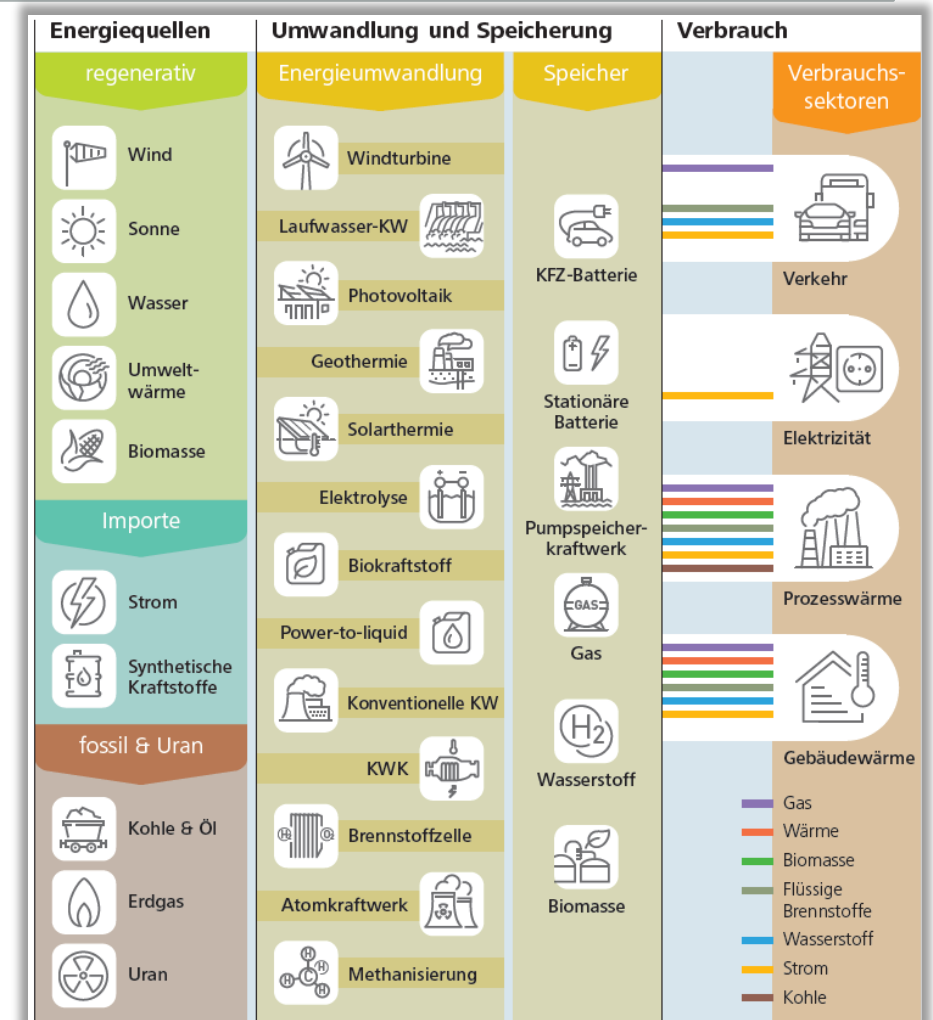
Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland



Systemanalyse – Methodik

Regenerative Energien Modell REMod

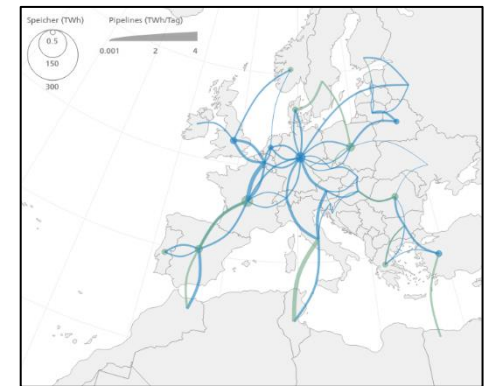
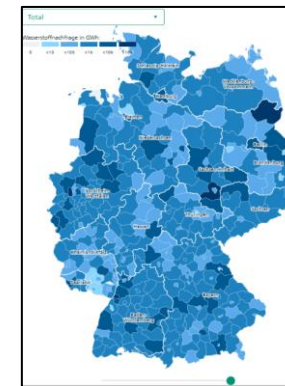
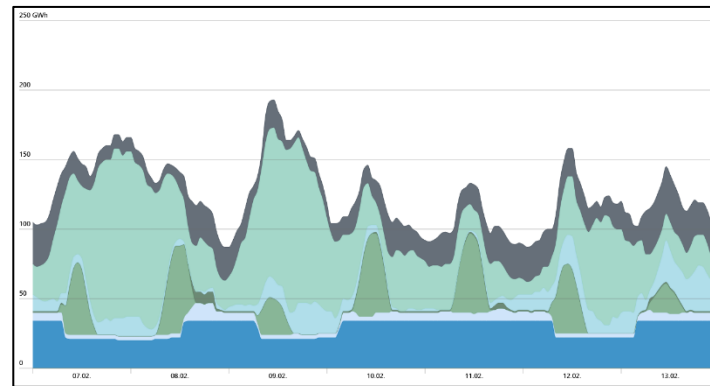
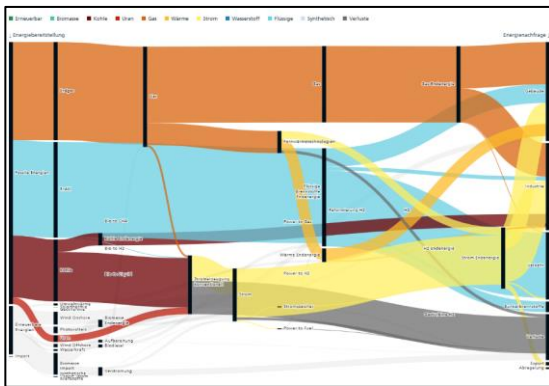
- **Modell zur Simulation und Optimierung der Entwicklung nationaler Energiesysteme**
 - Einbeziehung aller Verbrauchssektoren und Energieträger
 - Minimierung der Transformationskosten
 - Stundengenaue Modellierung



Erkundungstour der Visualisierung



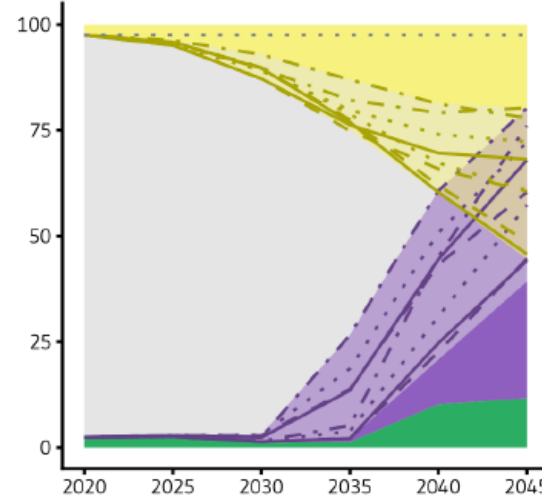
<https://fraunhofer.wasserstoff-story.de/>



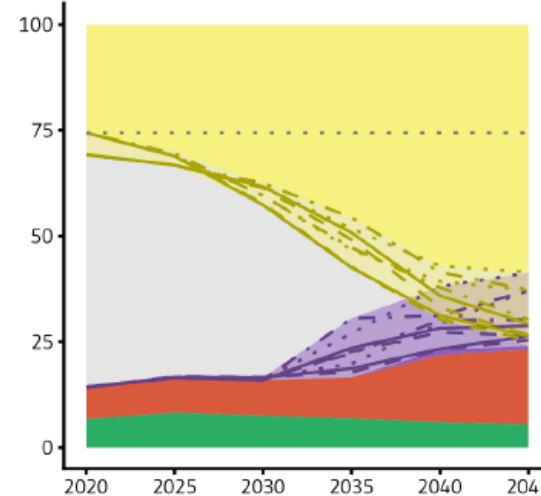
Unsicherheiten bezüglich der Verwendung von Wasserstoff Studienvergleich

- Im Gebäudesektor wird Wasserstoff und synthetische Energieträger in einigen Szenarien gesehen in anderen aber auch gar nicht
- Im Verkehrs- und Industriesektor wird in allen Szenarien die Verwendung synthetischer Energieträger gesehen

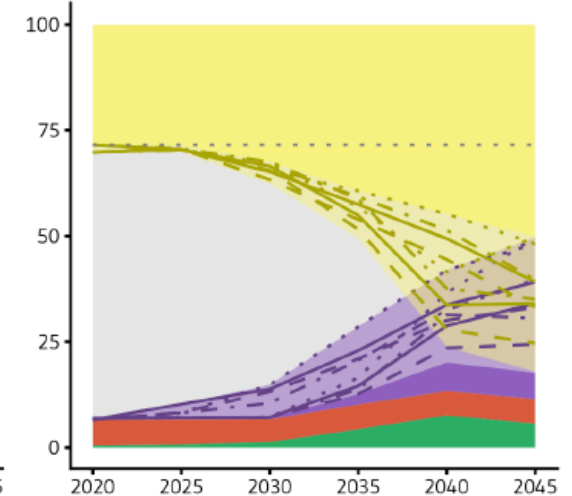
b Endenergie-Anteile, Verkehr [%]



c Endenergie-Anteile, Gebäude [%]



d Endenergie-Anteile, Industrie [%]



Energieträger

- Elektrizität
- Fossile Brenn- und Grundstoffe
- Wasserstoff + E-Fuels
- Wärmenetze
- Biomasse

Szenario

- Technologiemix
- Elektrifizierung
- Wasserstoff
- - E-Fuels

Fazit – Die Rolle von Wasserstoff in einem kostenoptimalen System

- Energiesystemmodelle können unter anderem Entscheidungsträger:innen Orientierungswissen für kostenoptimale, zielkompatible Transformationspfade des Energiesystems liefern.
- Unsere Sankey-Diagramme ermöglichen ein detailliertes Erkunden der Zusammenhänge der Energieflüsse in unserem heutigen und in möglichen zukünftigen Systemen von der Primärenergie hin zu den Endverbrauchssektoren.
- Wie ein treibhausgasneutrales System aussehen kann, kann sich in den einzelnen Sektoren unterscheiden, abhängig von Technologiepfaden die entweder stärker oder schwächer ausgeprägt werden.
- Zwischen verschiedenen Energiesystemmodellen herrscht jedoch Einigkeit in der Verwendung von Wasserstoff (oder anderen synthetischen Energieträgern) im Verkehrssektor sowie der Industrie.

Genutzte Studien zur weiteren Vertiefung

- [Eröffnungsbilanz Klimaschutz](#)
- [Ariadne Kurzdossier 2021: Durchstarten trotz Unsicherheit](#)
- [Wege zu einem Klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen: Update Klimaneutralität 2045 zur Studie](#)

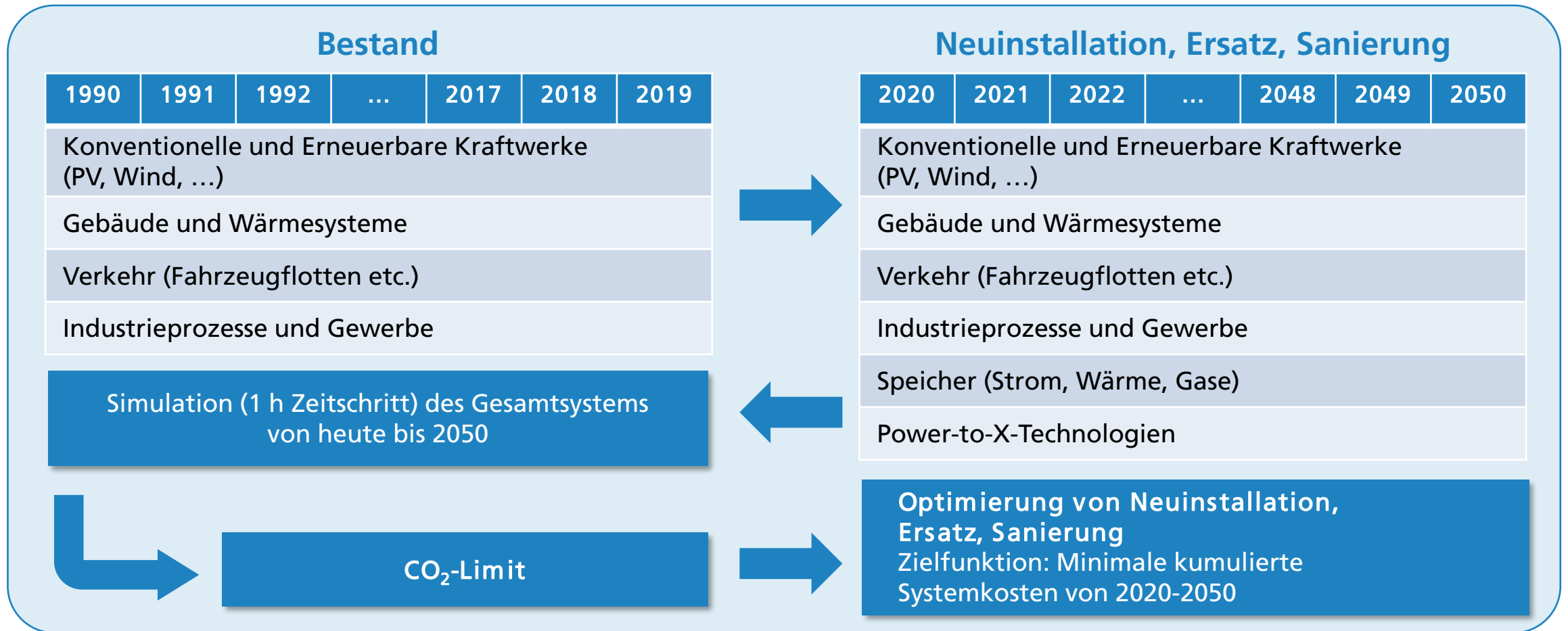
Kontakt:
charlotte.senkpiel@ise.fraunhofer.de

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



<https://fraunhofer.wasserstoff-story.de/>

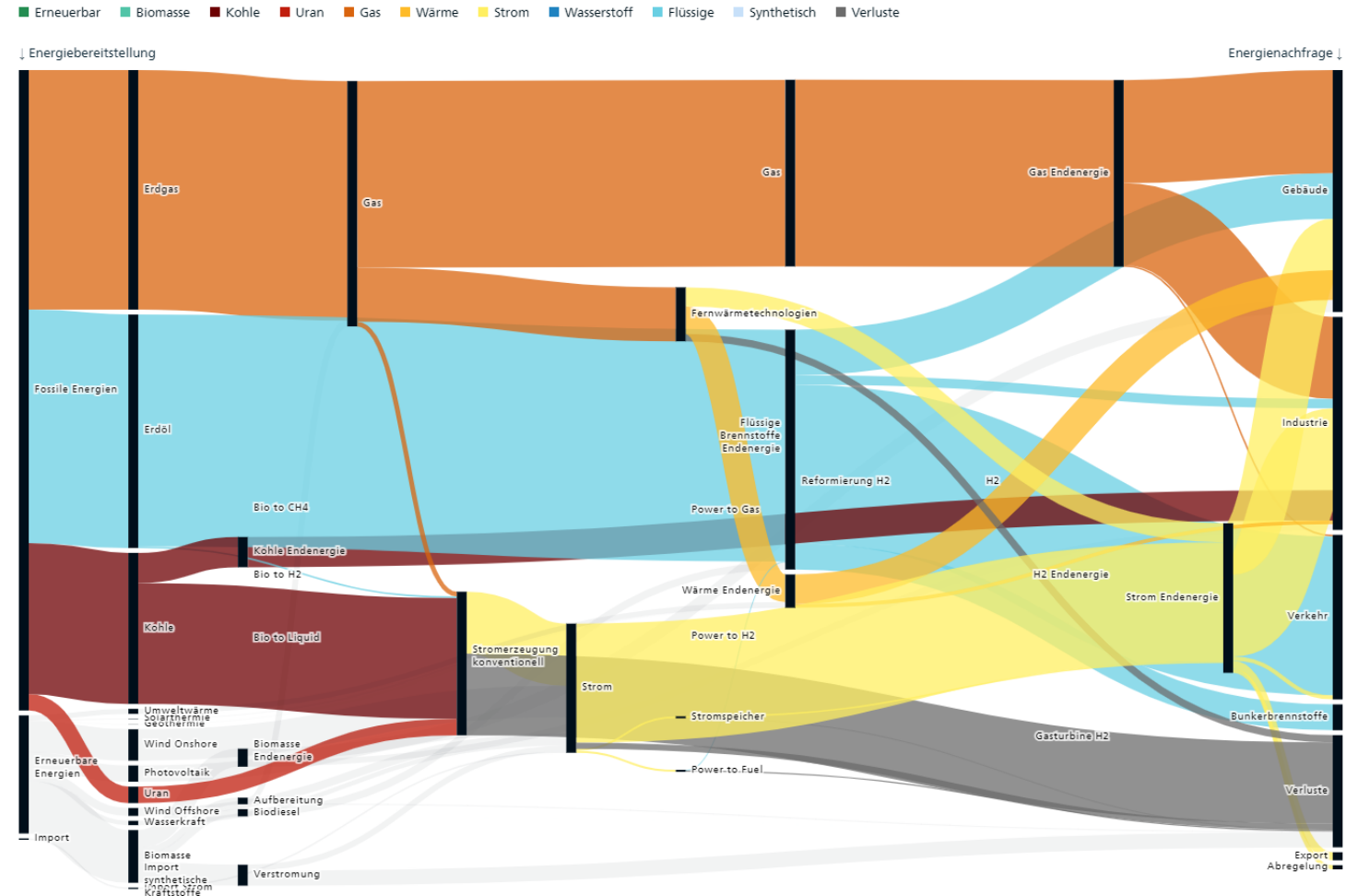
Systemanalyse – Methodik



Das Energiesystem im Wandel

Die heutigen Energieflüsse

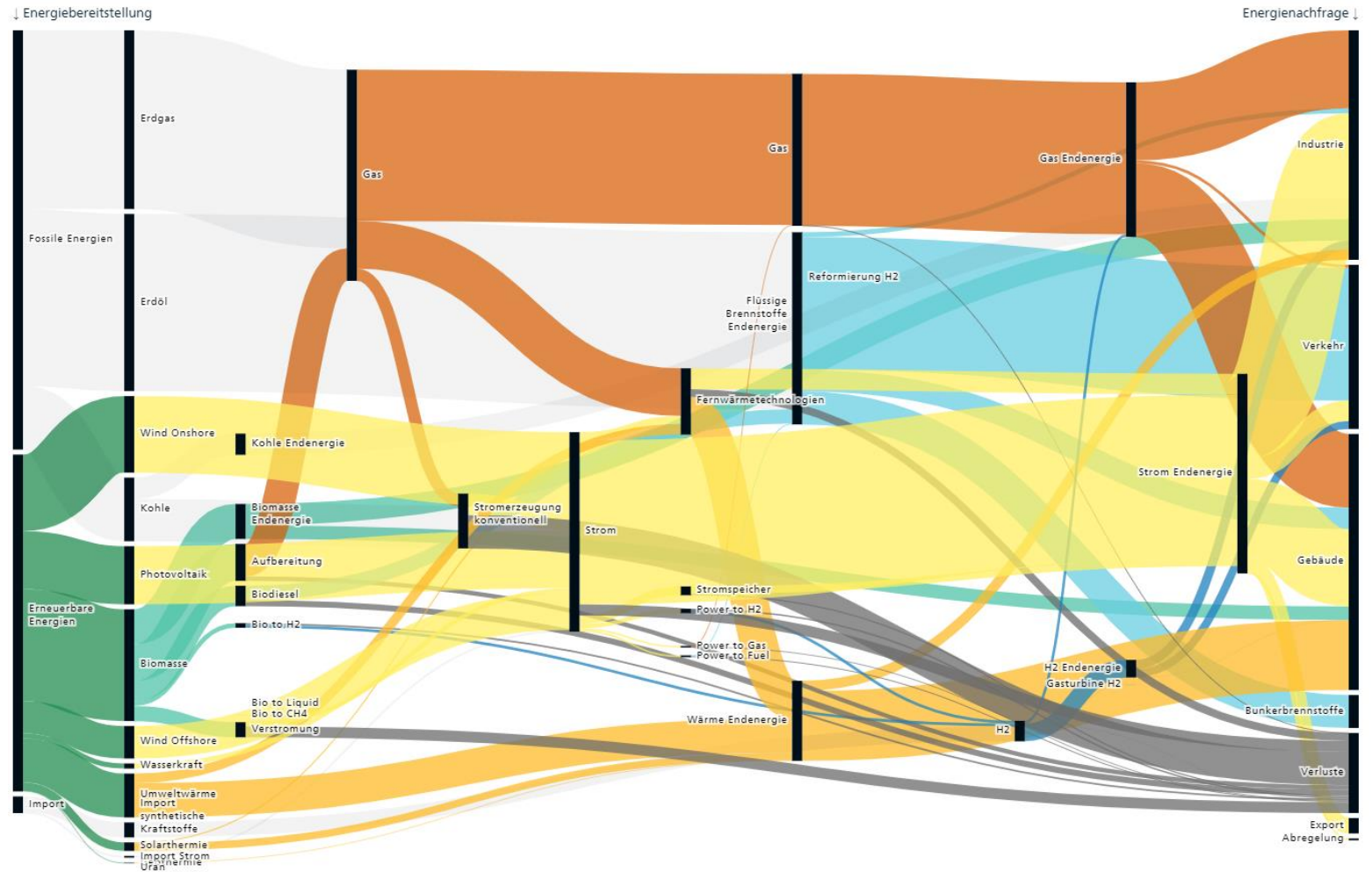
- Fossile Energieträger dominieren das heutige Energiesystem. An den knapp 12.200 PJ Primärenergieverbrauch im Jahr 2021 lag der Anteil der Erneuerbaren bei 16%.
- Die Wandlungseffizienz liegt heute bei ca. 73%.
- Klimaneutralität muss sowohl auf der Bereitstellungs- sowie der Anwendungsseite realisiert werden.
- Wasserstoff spielt heute als Energieträger kaum eine Rolle.



Das Energiesystem im Wandel

Das Jahr 2030 (-65% THG-Emissionen gegenüber 1990)

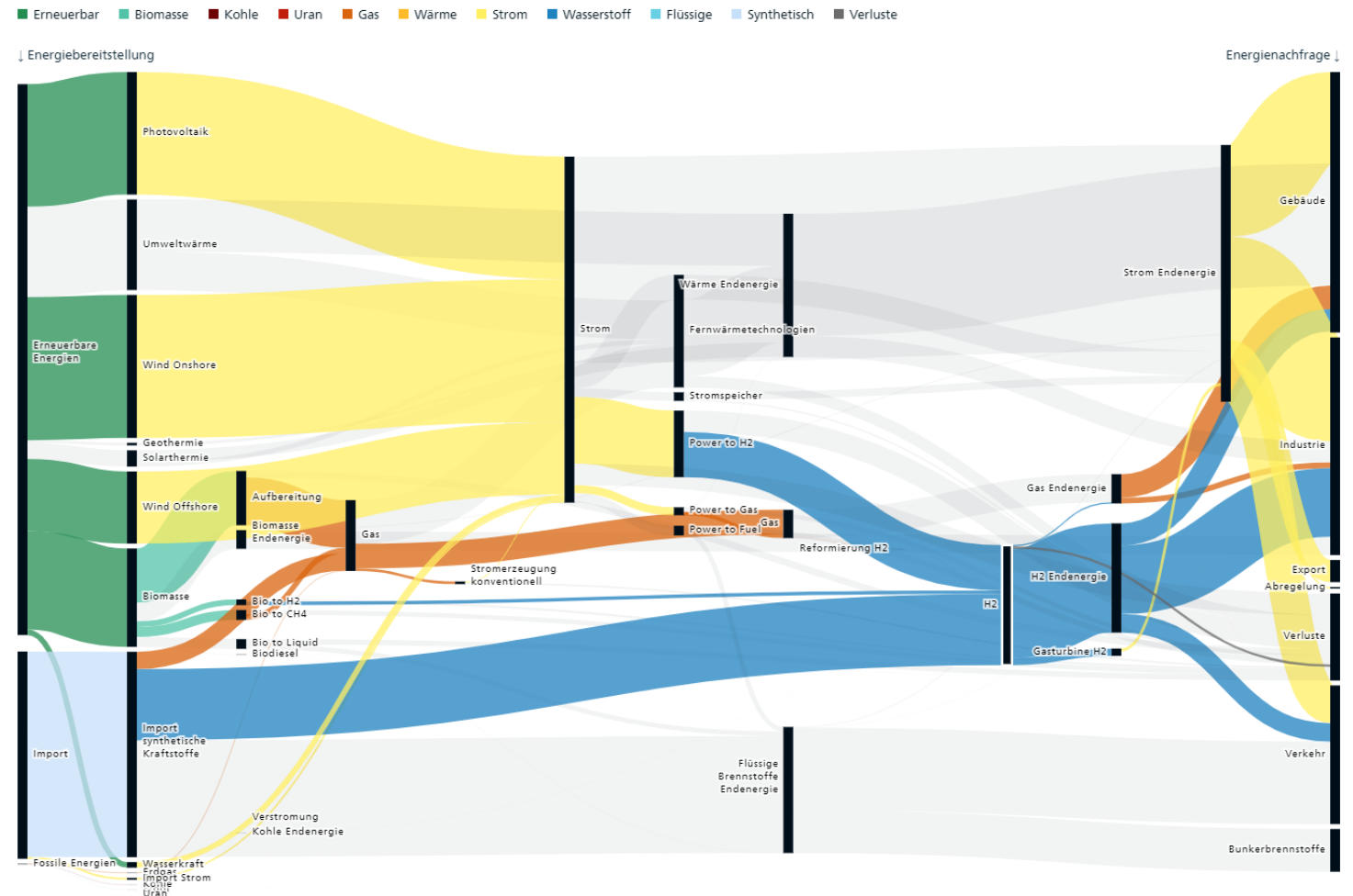
- Der Anteil Erneuerbarer an der Primärenergiebereitstellung ist deutlich erhöht.
- Die Wandlungseffizienz hat sich gesteigert.
- Die direkte Elektrifizierung durch Strom (PV, Wind) sowie die Verwendung von Umweltwärme und Biomasse hat an Bedeutung gewonnen.
- Der synthetische Energieträger Wasserstoff findet Verwendung in der Industrie und im Verkehr.



Das Energiesystem im Wandel

Das Klimaneutrale System

- Die Energiebereitstellung basiert in diesem Szenario auf erneuerbaren und dem Import von Wasserstoff / synthetischer Kraftstoffe.
- Die direkte Elektrifizierung nimmt die dominante Rolle der Energiebereitstellung ein.
- Wasserstoff kann (je nach Szenario) in allen Verbrauchssektoren angewandt werden.
- Die Hauptanwendung ist jedoch in der Industrie, wo es wenig Alternativen gibt.



Wasserstoff, wie geht es weiter?

Antworten aus der Fraunhofer-Systemmodellierung

Versorgungssicherheit: Der Beitrag von Wasserstoff im europäischen Strom- und Gasmarkt

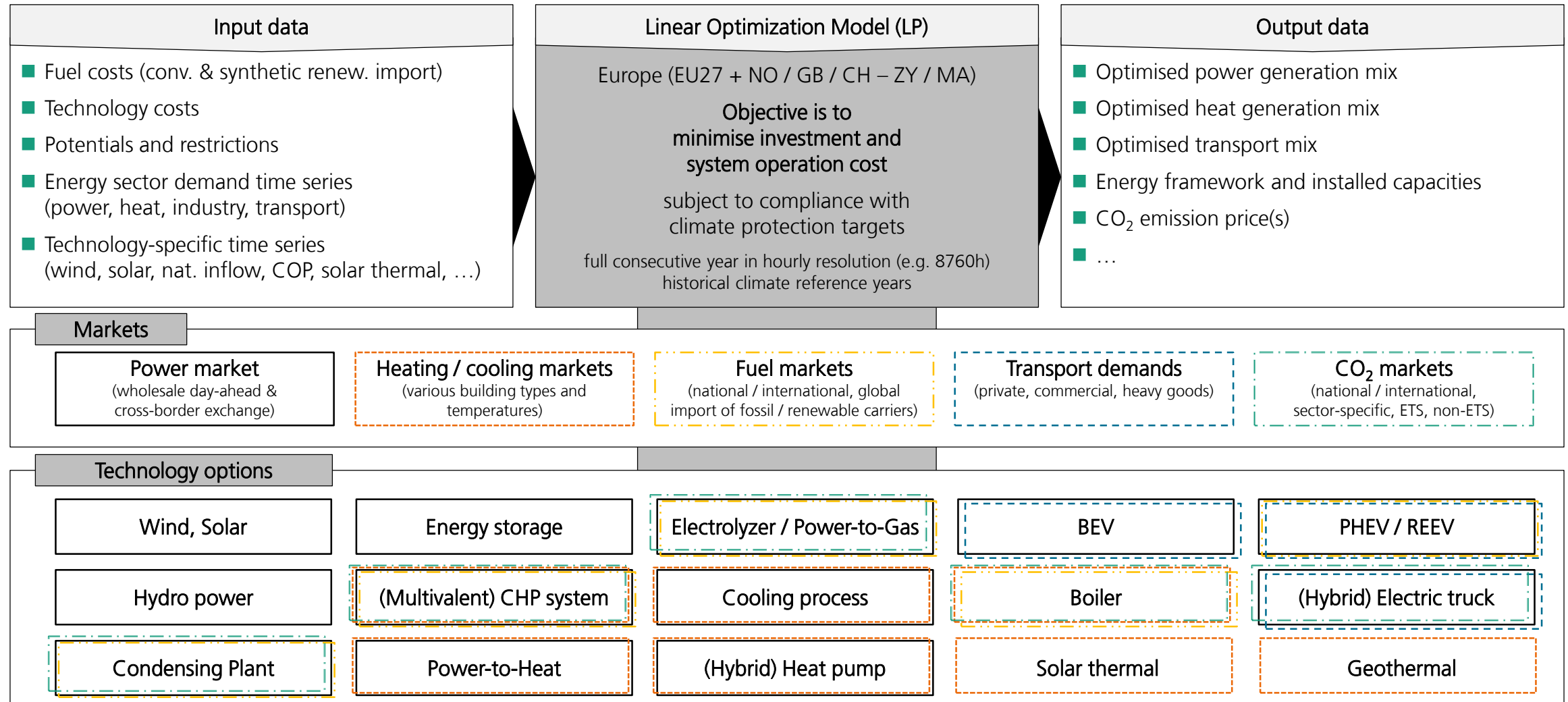
Richard Schmitz, Norman Gerhardt

Kassel, 20.01.2022

Agenda

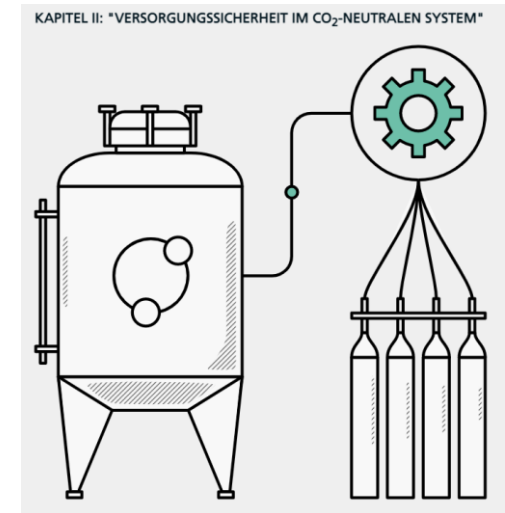
- Versorgungssicherheit im CO₂-neutralen System mit Fokus auf Strom
 - Das Modell „SCOPE Scenario Development (SCOPE SD)“
 - Randbedingungen und Ergebnisse der Modellierung
 - Fluktuierende Erzeuger, Dunkelflauten und die Rolle von Elektrolyseuren
- Europäische Vernetzung und Rückkopplung auf die Gaswirtschaft
 - Das „European Infrastructure Gas Market Model (ENIGMA)“
 - Wasserstoff und reg. Methan in 2050 – Nachfrage, Produktion und das europäische Gasnetz
- Fazit

Fokus Strom: SCOPE Scenario Development (SCOPE SD)



Allgemeine Randbedingungen zur Modellierung

- Europäisches Klimaziel: 2050 als Zieljahr mit Treibhausgasneutralität
- Verwendung des Wetterjahres 2012
- PtX-Importpreise: 85,00 € / MWh_{H₂}, 124,40 € / MWh_{PtL-Import}, 106,30 € / MWh_{PtCH₄-Import}
 - Opportunität zur europäischen PtX-Erzeugung
- Industrieverbräuche und fixe Emissionen von FORECAST (Fraunhofer ISI)
- Kalkulatorischer inflationsbereinigter Zinssatz von 6%, reale Kosten

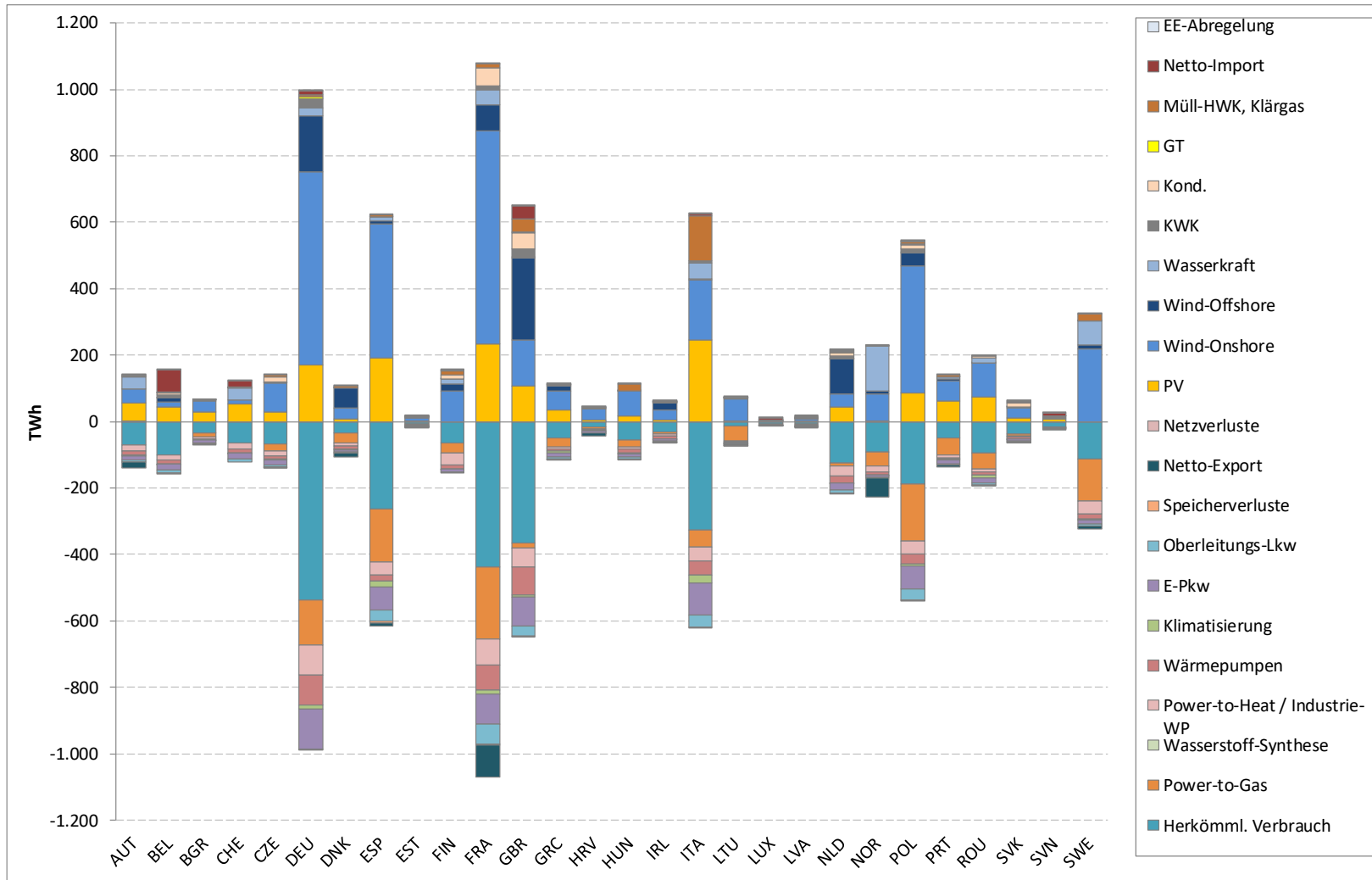


Exkurs: Die europäische Gasbilanz in versch. Szenarien in 2050 (ohne int. Verkehr)

in MWh	Szenario 1 (85,00€/MWhH2)		Szenario 2 (72,50€/MWhH2)		Szenario 3 (97,50€/MWhH2)	
	Erzeugung/Einkauf	Verbrauch	Erzeugung/Einkauf	Verbrauch	Erzeugung/Einkauf	Verbrauch
Elektrolyseure (EU)	876.911.503		516.234.408		899.859.867	
H2-Import (non EU)	0		505.900.334		0	
CH4-Import	130.503.780		137.803.190		93.556.014	
PtL-Import	92.059.170		94.052.726		85.882.152	
Gutschrift Biomethan	116.079		62.230		116.955	
Kondensationskraftwerke		83.349.382		123.408.361		95.515.040
Gasturbinen		34.119.331		35.520.078		49.741.966
KWK-Anlagen		289.788.219		362.011.628		285.999.041
Backup-Kessel (zentral)		44.999.913		48.511.894		44.058.042
Boiler (Fernwärme)		109.701.843		137.676.117		109.593.838
Boiler (dezentral)		130.503.780		137.803.190		93.556.014
Brennstoffzellen-LKW		78.253.886		78.253.886		78.253.886
PtL-Fahrzeuge		92.059.170		94.052.726		85.882.152
Industrie		236.815.008		236.815.008		236.815.008

- Intuitive Ergebnisse: Je billiger H₂/CH₄/PtL, desto mehr werden sie auf der Verbrauchs-Seite eingesetzt (1: 1.099 TWh → Sz.2: 1.254 TWh), jedoch reduziert eine Steigerung des H₂-Importpreises nur geringfügig den PtX-Bedarf (1: 1.099 TWh → Sz.3: 1.079 TWh)
- H₂-Import von außerhalb Europas (per Pipeline aus der MENA-Region) findet nur bei einem H₂-Preis von 72,50 € (Szenario 2) statt

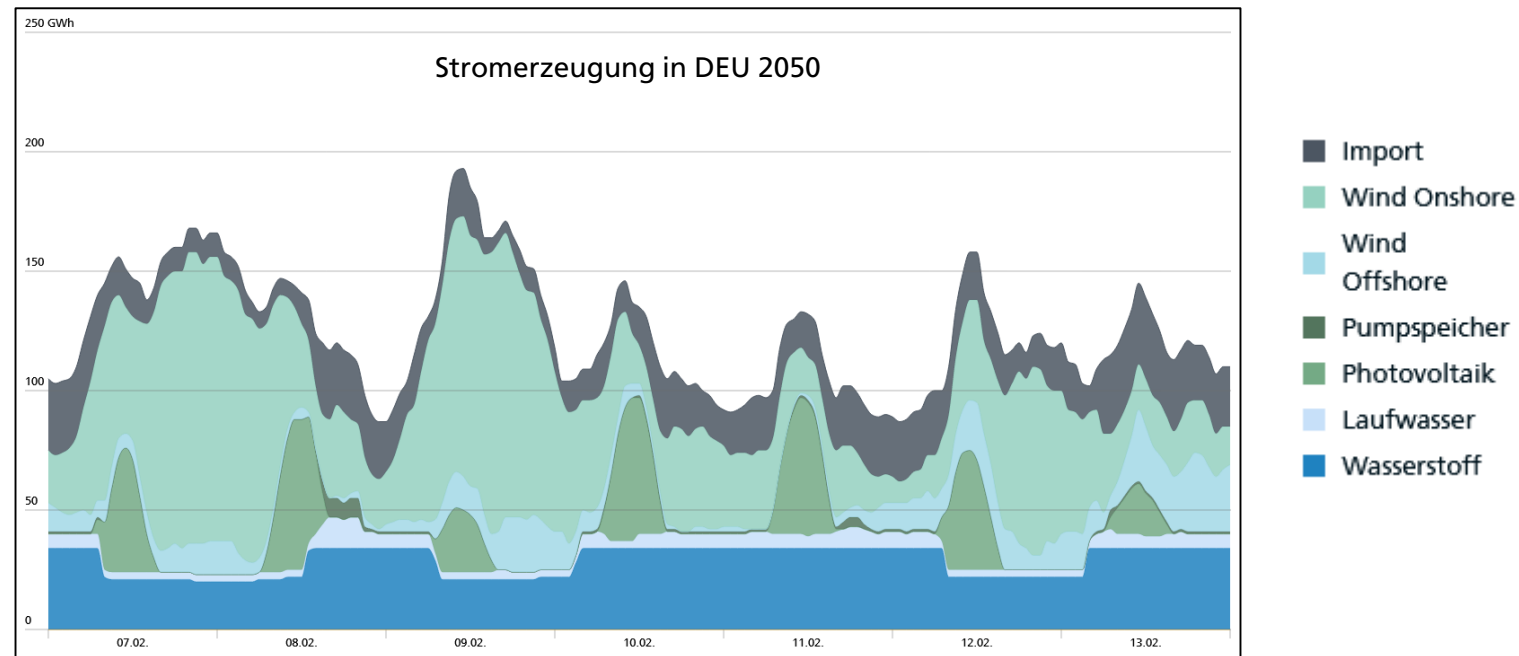
Die europäische Strombilanz in 2050



Schlussfolgerungen:

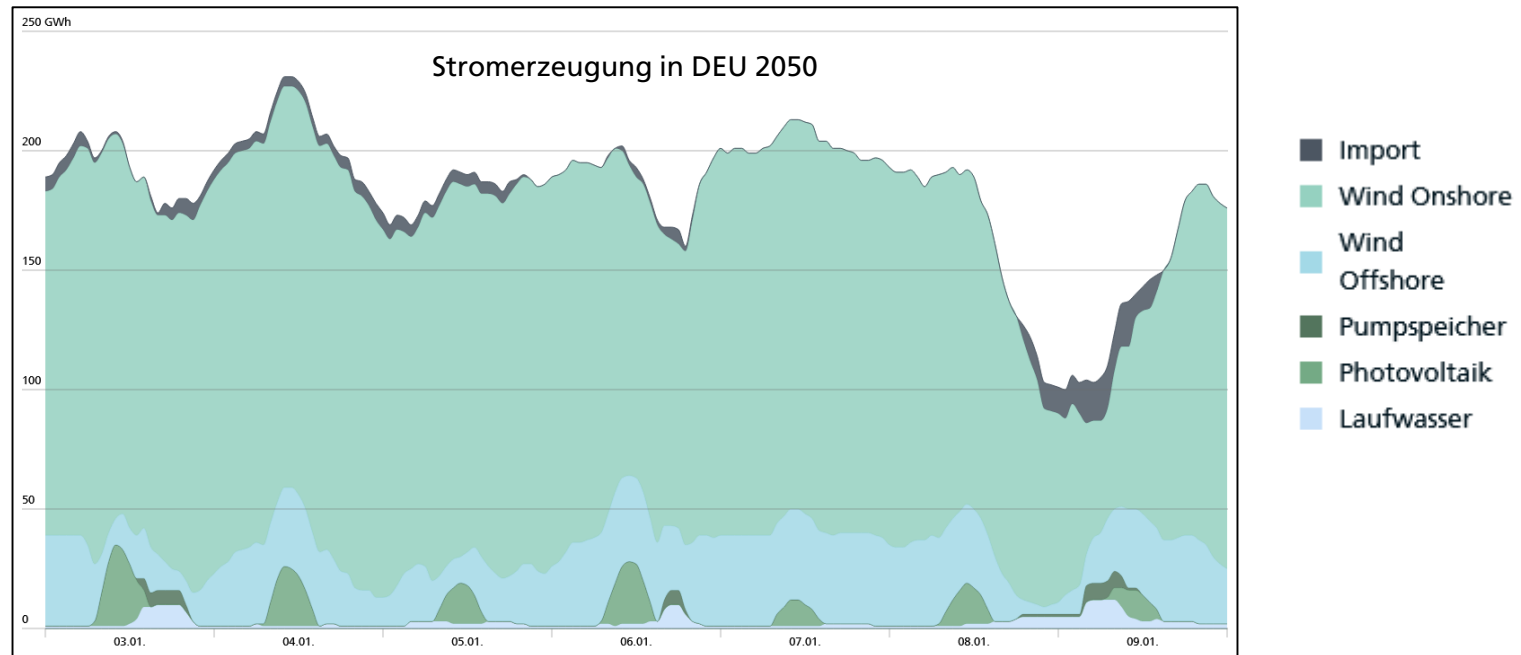
- Je geringer der H₂-Import-Preis, desto höher die Stromproduktion in zentralen thermischen Kraftwerken
- Je geringer der H₂-Import-Preis, desto geringer die heimische H₂-Produktion in Europa
- Bedingt durch diese beiden Punkte sinkt die Stromerzeugung aus Wind und PV, je niedriger der H₂-Import-Preis ist

Gewährleistung der Versorgungssicherheit auch bei kalten Dunkelflauten



- Während Dunkelflauten ist nur wenig bis gar keine Einspeisung von Wind und PV in Deutschland vorhanden, für die Versorgungssicherheit ist dabei der Winter mit hohem Wärmebedarf relevant → Fokus: kalte Dunkelflaute
- Die Berechnungen zeigen: **Kurzfrist**flexibilität und der europäische Austausch dienen zur Vergleichmäßigung, Wasserstoff ist hingegen als **Langfrist**speicher zur Stromproduktion in Kraftwerken wichtig. Zusätzlich kann z.B. in der Fern- und Industriewärme durch den Einsatz von Wasserstoffheizwerken die Stromnachfrage reduziert werden.

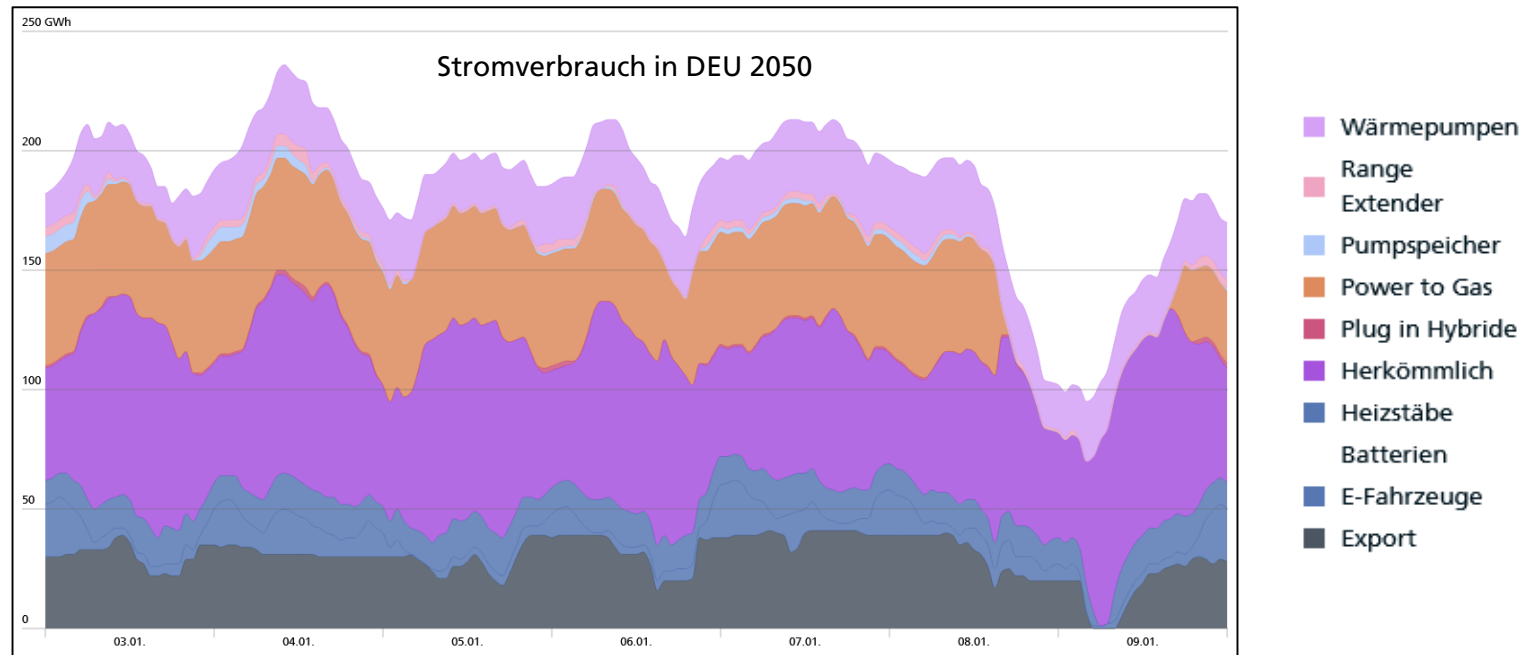
Auch ohne fossile Kraftwerke kaum Abregelung von Wind und PV



- In Zeiten mit hoher Einspeisung aus Wind und PV besteht vermeintlich die Gefahr, dass große Mengen abgeregelt werden müssen
- Die Berechnungen zeigen: Durch den Einsatz flexibler Verbraucher wie bspw. H₂-Elektrolyseure oder Elektrodenkessel/Elektroautos kann dies verhindert werden (siehe nächste Folie).

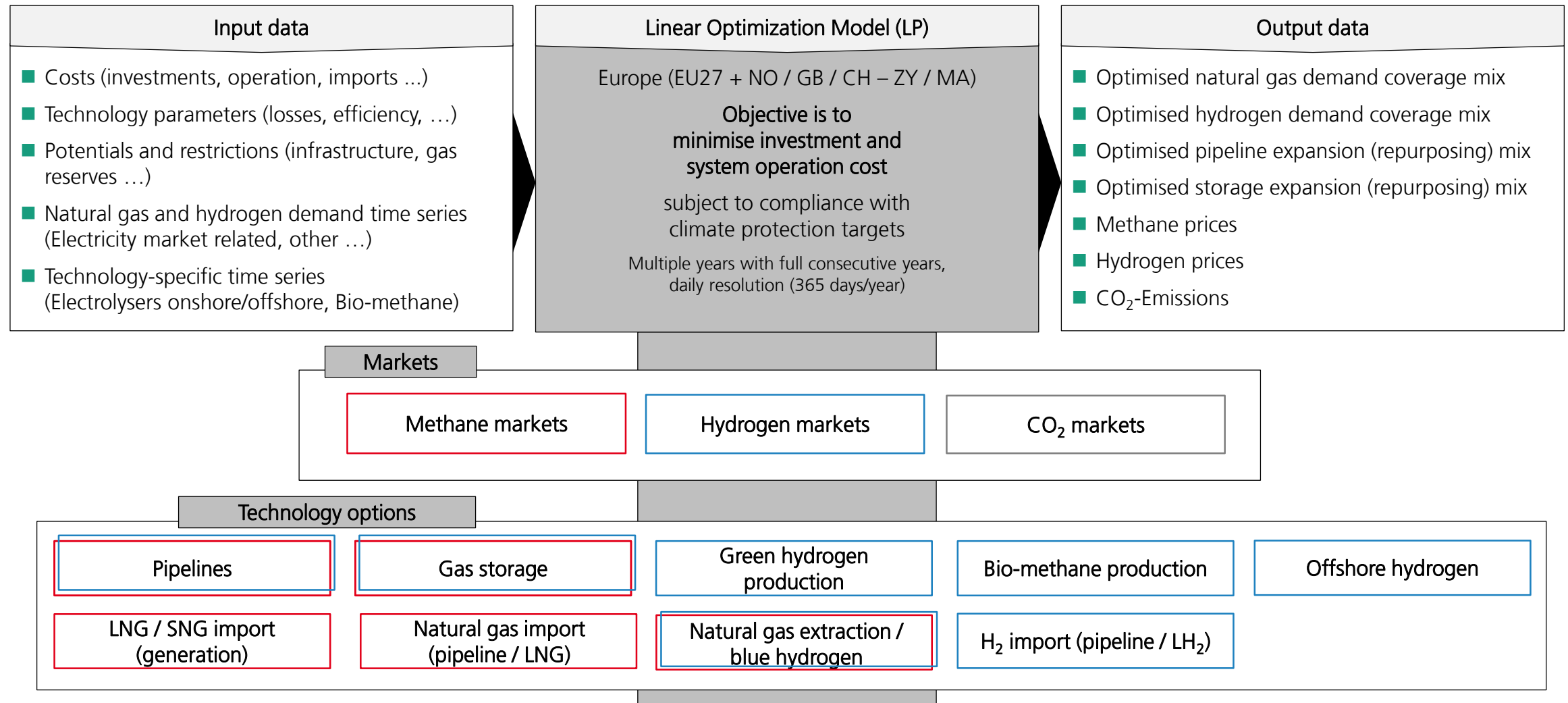
Weniger als 1% der möglichen Erzeugung aus Wind und PV muss im Strommarkt abgeregelt werden.

Elektrolyseure dienen als flexible Stromverbraucher

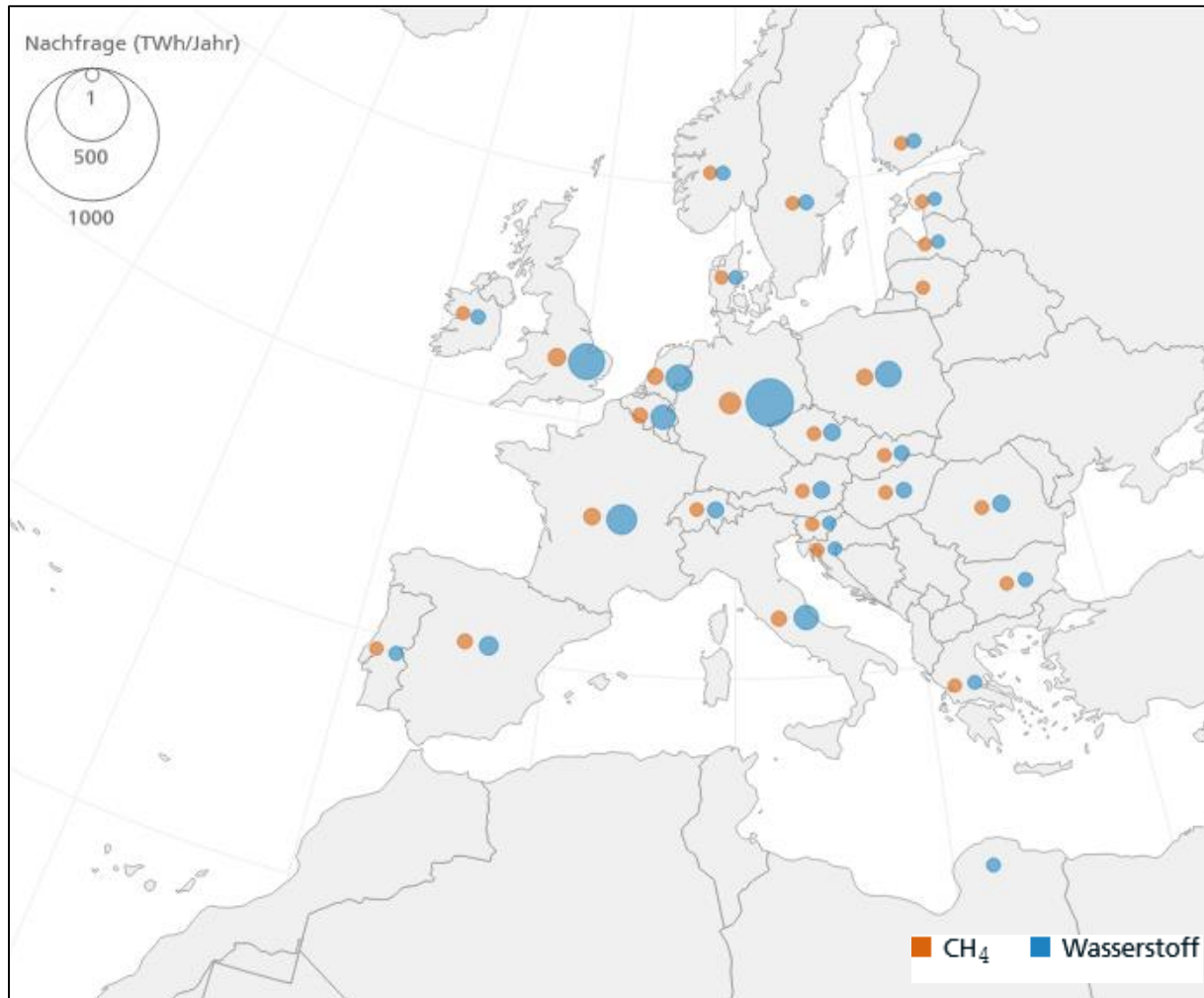


- H₂-Elektrolyseure können ihre Erzeugung flexibel an das Stromangebot anpassen
- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht können geringe Strompreise effizient ausgenutzt werden. Gleichzeitig trägt die Elektrolyse zur Stabilisierung der Marktwertfaktoren von Wind und PV und damit zu deren Refinanzierung bei.
- Aus Sicht des Energiesystems erfolgt ein wettbewerbsfähiger Ausbau und eine effiziente Nutzung des zur Verfügung stehenden Stroms.

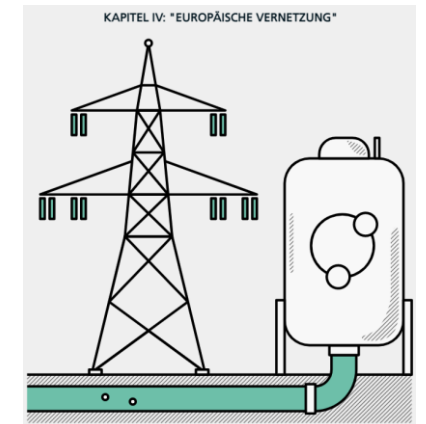
Fokus Gas: European Infrastructure Gas Market Model (ENIGMA)



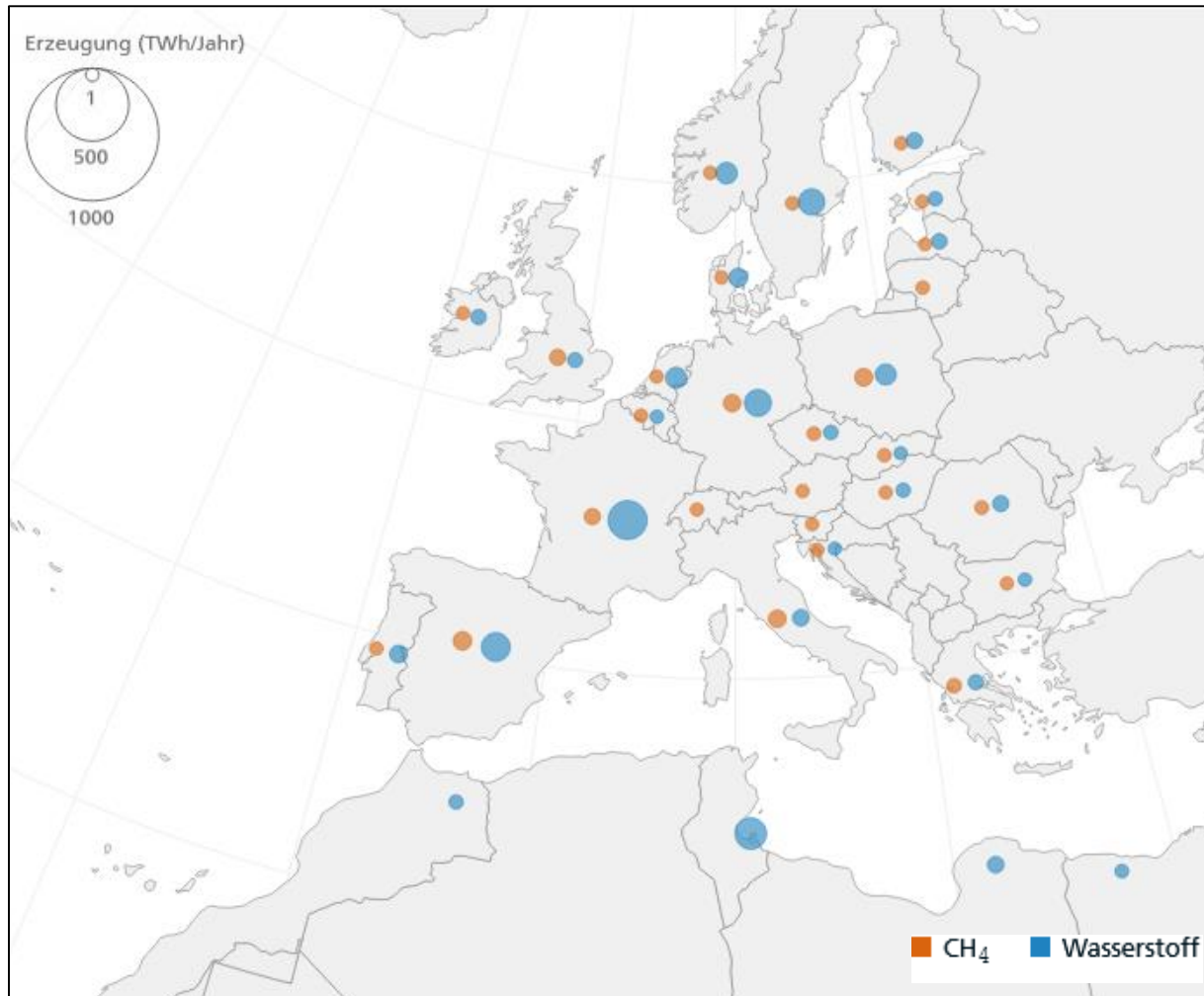
Nachfrage nach reg. Methan und Wasserstoff im Jahr 2050



- In 2050 sind keine Emissionen mehr im Gassektor zulässig.
- Daher basiert die Gasversorgung und somit die Nachfrage dann komplett auf Wasserstoff und regenerativem Methan bzw. Biomethan.

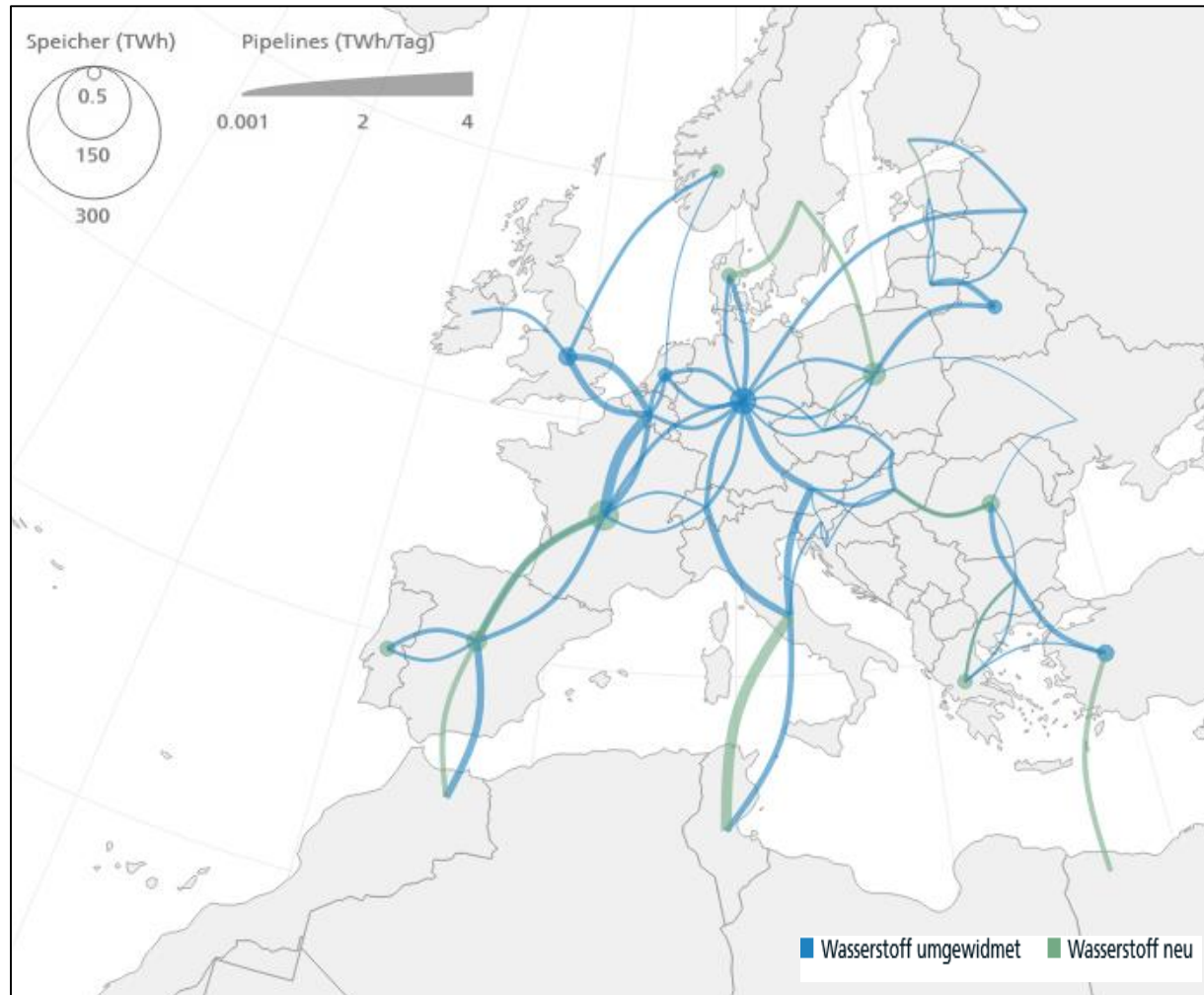


Produktion von reg. Methan und Wasserstoff im Jahr 2050



- Wasserstoff kann entweder aus dem außereuropäischen Ausland (bspw. Nordafrika) importiert oder inländisch produziert werden.
- Beim Import aus dem Ausland wird zwischen flüssigem und gasförmigem Import unterschieden.
- Ein Großteil des außereuropäischen Imports stammt aus Tunesien.

Das europäische Gasnetz im Jahr 2050



- Ein Großteil des aktuell bestehenden Erdgas-Netztes kann umgewidmet werden. Viele bestehende Leitungen werden jedoch nicht weiter benötigt.
- Energiedichte beim Transport zwischen H_2 und CH_4 ist vergleichbar
- Der Bedarf an neuen innereuropäischen Pipelines ist verhältnismäßig gering. Ein Neubau findet hauptsächlich zwischen Nordafrika und Europa statt.
- Hoher Bedarf an Kavernenspeichern für H_2
 - Energiedichte bei Speicherung ist bei H_2 viel geringer als bei CH_4

Fazit

- Ein CO₂-neutrales Energiesystem bis 2045/2050 ist ein realistisches Ziel
- Die Versorgungssicherheit ist jederzeit durch H₂-Kraftwerke gewährleistet
- Große Flexibilität für das europäische Energiesystem entsteht durch den Ausbau von Übertragungskapazitäten, sowohl im Stromnetz als auch durch Umwidmung im Gasnetz

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



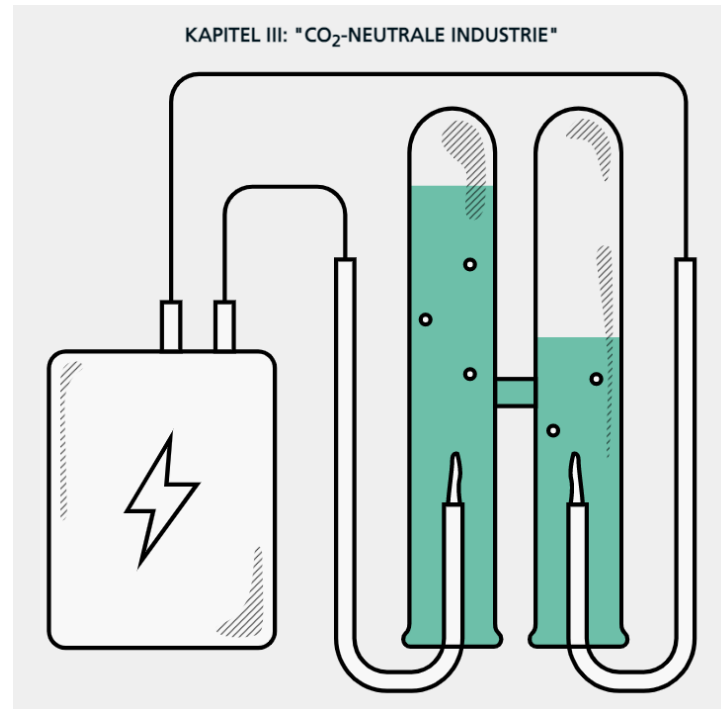
M.Sc. Richard Schmitz

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Energiewirtschaft und Systemanalyse
Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE

Königstor 59 | 34119 Kassel
Telefon +49 561 7294-1252 | Fax +49 561 7294-260
richard.schmitz@iee.fraunhofer.de

KAPITEL III: CO₂-NEUTRALE INDUSTRIE

Tobias Fleiter, Pia Manz, Marius Neuwirth, Matthias Rehfeldt

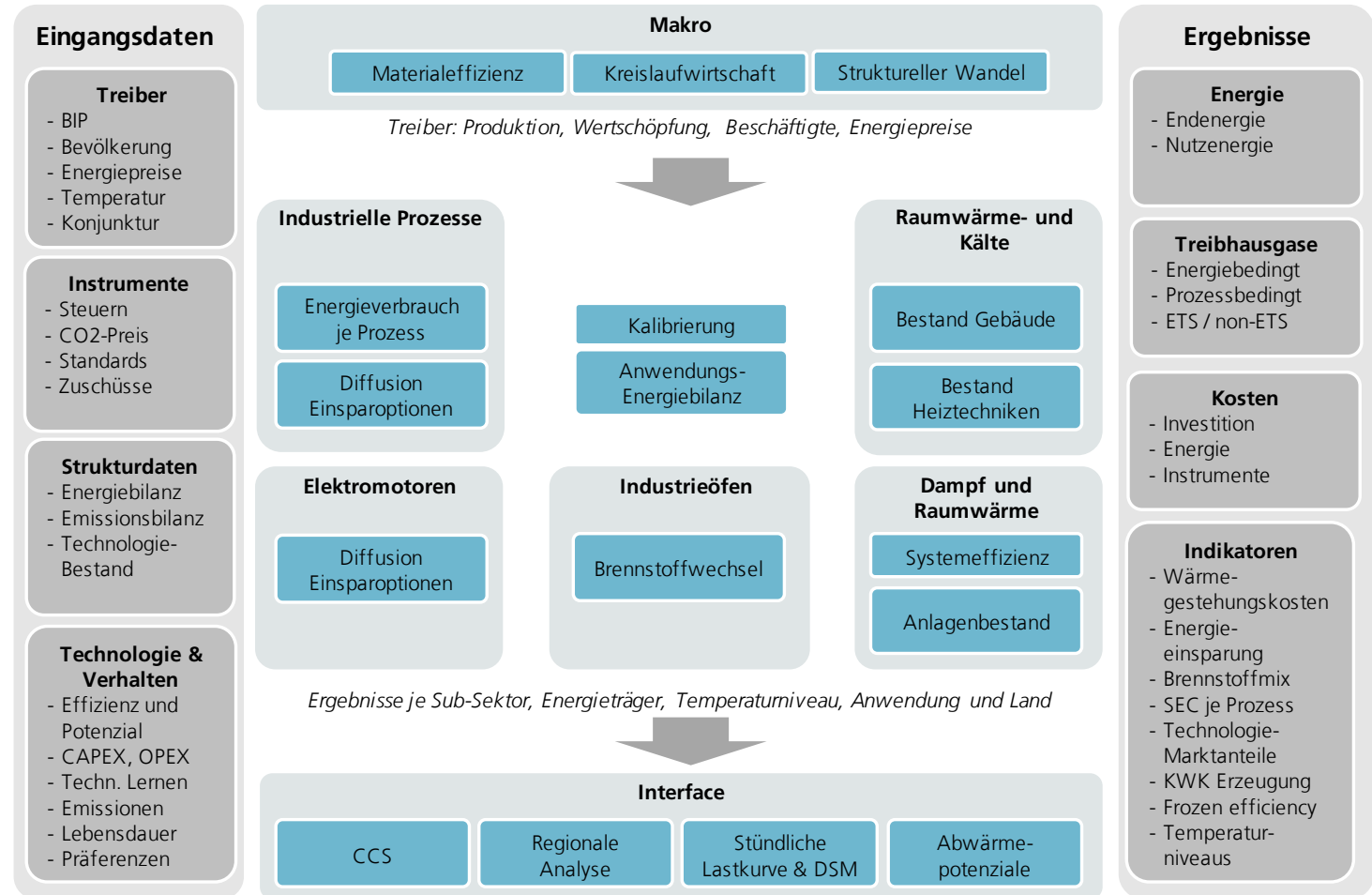


Methode I: Erstellung von Szenarien mit dem Simulationsmodell FORECAST

- Bottom-up Simulation
- Hohe Technologie-Auflösung
- Alle wichtigen Vermeidungshebel
- Vollständige Energie- und THG Bilanz

<https://www.forecast-model.eu>

FORECAST
 FORecasting Energy Consumption Analysis
 and Simulation Tool



Methode II: Verteilung der Szenarioergebnisse auf Regionen anhand von regionalen Daten

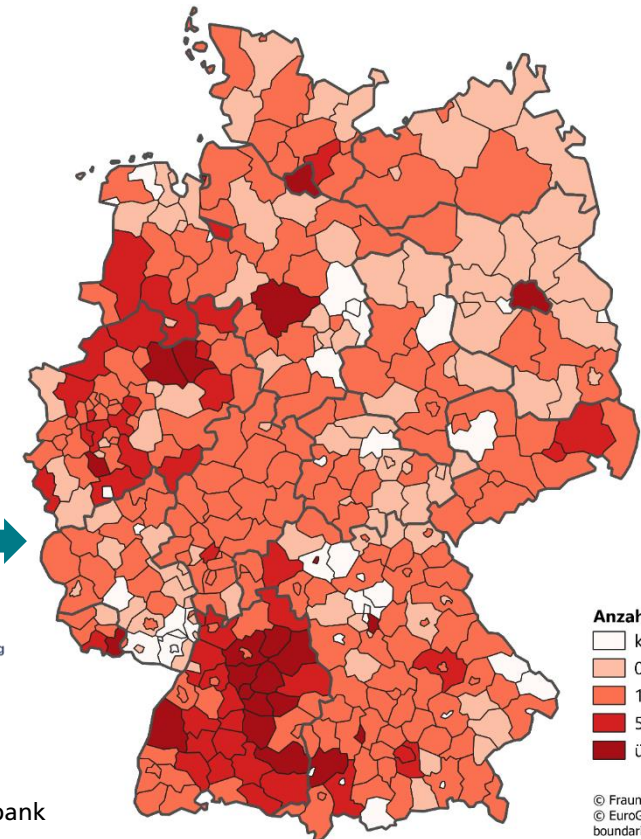
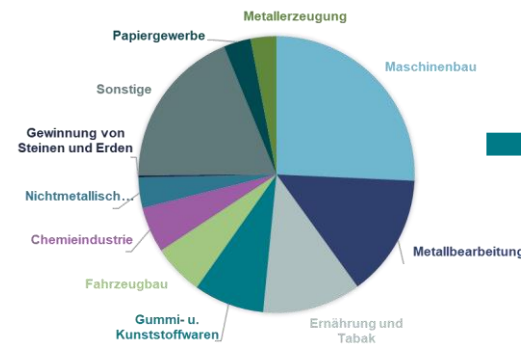
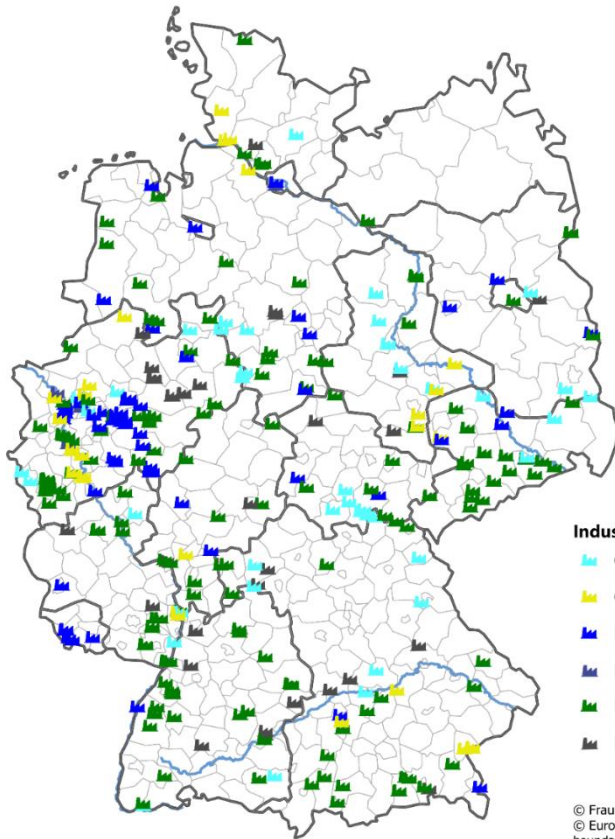
Energieintensive Industrie

Nicht energieintensive Industrie

Verteilschlüssel

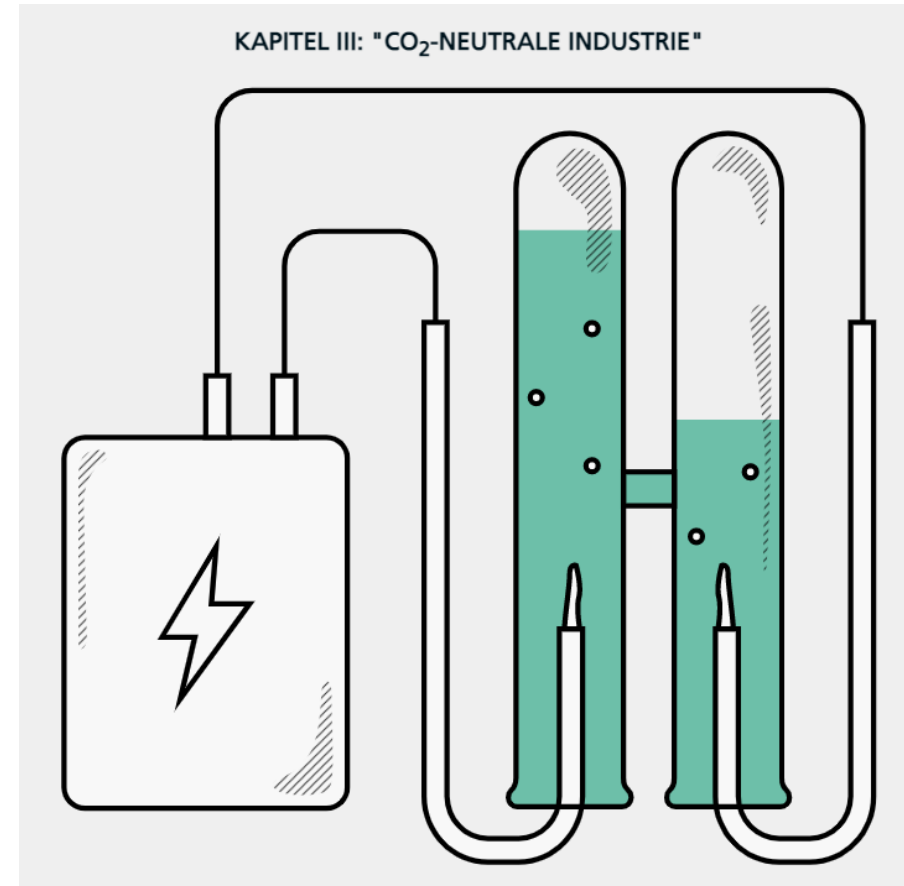
Produktionsmenge je Standort

Beschäftigte pro NUTS 3 Region



Wasserstoff für die Versorgung einer CO₂-neutralen Industrie

- Status-Quo: Einsatz von grauem/fossilem Wasserstoff über Dampfreformierung von Erdgas in der Herstellung von Ammoniak und in Raffinerien genutzt
- Mögliche Bereiche für zukünftigen Einsatz:
 1. Reduktionsmittel und Energieträger für die **Herstellung von Stahl**
 2. Einsatz als Rohstoff für die chemische Industrie zur **Herstellung von Ammoniak oder Olefinen und Aromaten**
 3. Einsatz als Energieträger für die **Bereitstellung von Prozesswärme** in vielen Industriebranchen



Szenario-Annahmen

■ Grundlage: Langfristszenarien III Industriebericht

	TN-Strom	TN-PtG/PtL	TN-H2
Ziel THG Minderung 2050	Mindestens 95 % gegenüber 1990 für den Industriesektor (Dieses Ziel berücksichtigt noch nicht die Novelle des Klimaschutzgesetzes vom August 2021)		
Ziel THG Minderung 2030	Mindestens 49 bis 51 % Minderung (Dieses Ziel berücksichtigt noch nicht die Novelle des Klimaschutzgesetzes vom August 2021)		
Wirtschaftswachstum	Kontinuierlich, ~1 % pro Jahr		
Biomasse	Energetischen Einsatz minimieren		
Energie-, Materialeffizienz und Kreislauf	Ambitionierter Anstieg (siehe Abschnitt 2.4.2 bis 2.4.4)		
CCS und CCU	Fokus Zement- und Kalkwerke		
Prozess-, Brennstoff- und Rohstoffwechsel	Priorität direktelektrisch	Priorität PtG	Priorität Wasserstoff

Wasserstoff für die CO₂-neutrale Stahlproduktion



- **Staus-Quo:** In DE etwa 30 Mio. Tonnen Primärstahlproduktion über die Hochofenroute mit hohem Kohlebedarf für die Reduktion des Eisenerzes
- **CO₂-neutrale Stahlherstellung**
 - Der Ausbau der **Sekundärstahlherstellung** ist deutlich energieeffizienter und kann den Energiebedarf in der Stahlherstellung deutlich senken
 - **Direktreduktionsanlagen** betrieben mit Wasserstoff ersetzen verbleibende Hochöfen in der Primärstahlerzeugung und erlauben nahezu CO₂-neutrale Stahlherstellung
 - **Wasserstoffbedarf langfristig ~50-100 TWh**, verteilt auf wenige Standorte



Wasserstoff ermöglicht eine CO2-neutral Grundstoffindustrie



■ Status-Quo:

- Erzeugung von **Ammoniak** über grauen Wasserstoff (Dampfreformierung von Erdgas)
- Erzeugung von **Ethylen/Olefinen** über Steamcracking aus Naphtha

■ CO2-neutrale Herstellung

- Umstellung auf grünen Wasserstoff ermöglicht CO2-neutrale Herstellung
- Weitere Strategien inkl. Recycling und biobasierten Kunststoffen berücksichtigen
- **Wasserstoffbedarf langfristig ~100-150 TWh, verteilt auf wenige Standorte**



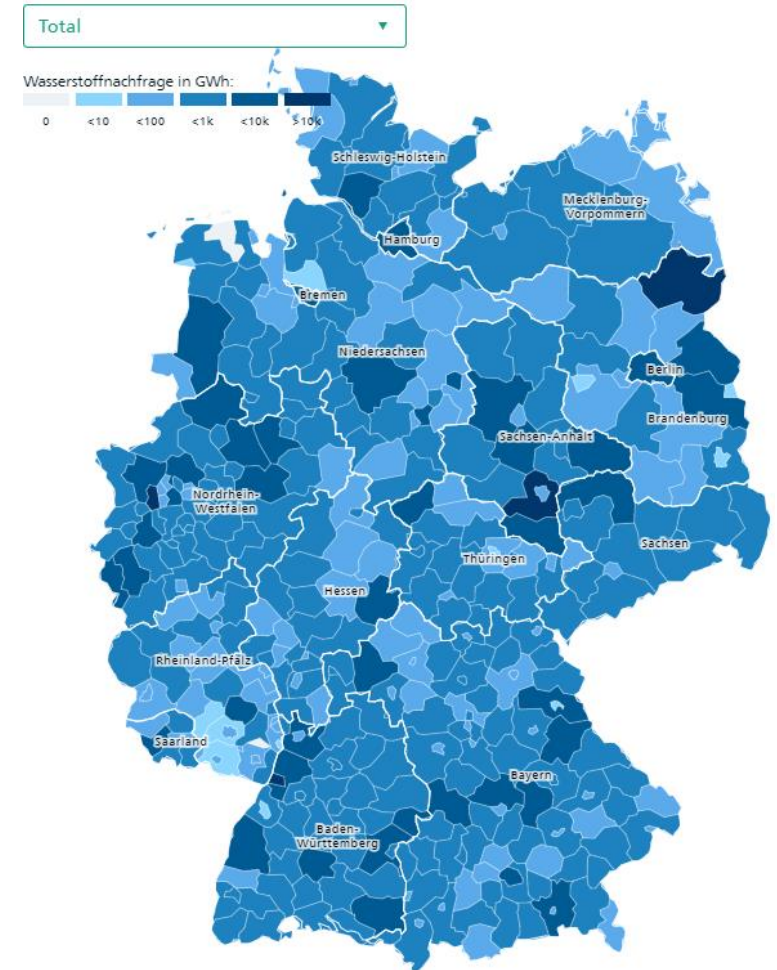
Wasserstoff zur Bereitstellung von Prozesswärme in allen Branchen

■ Status-Quo

- Prozesswärme in nahezu allen Branchen wichtig
- ~400 TWh Energiebedarf für Prozesswärme

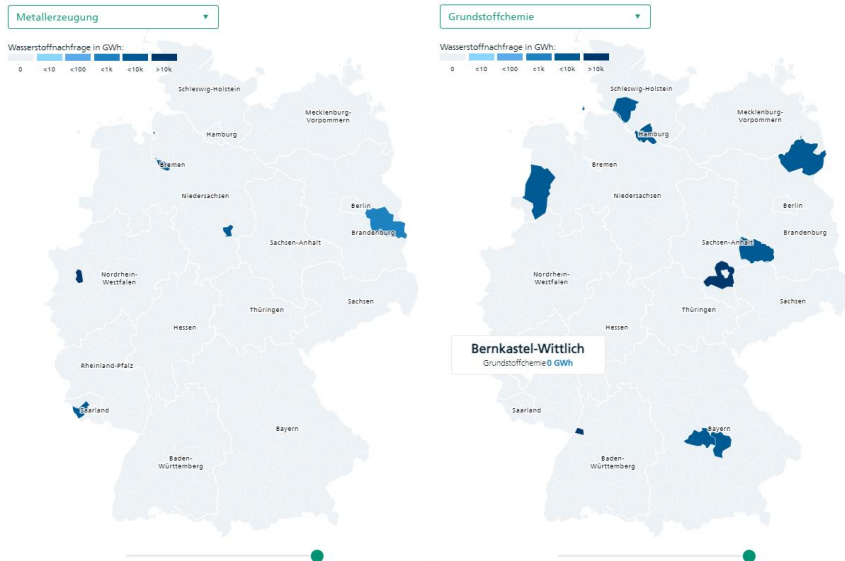
■ CO2-neutral

- Neben der Elektrifizierung und dem Einsatz von Biomasse ermöglicht Wasserstoff eine CO2-neutrale Prozesswärme
- Ergebnisse von Pilotanlagen deuten auf zukünftig breite Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff hin
- Bei großflächigem Einsatz von Wasserstoff in der Prozesswärme kann langfristig ein Bedarf von **100-350 TWh** entstehen



Wie großflächig wird der Einsatz von Wasserstoff in der Industrie sein?

~20 zentrale Stahl- und Chemie-Standorte

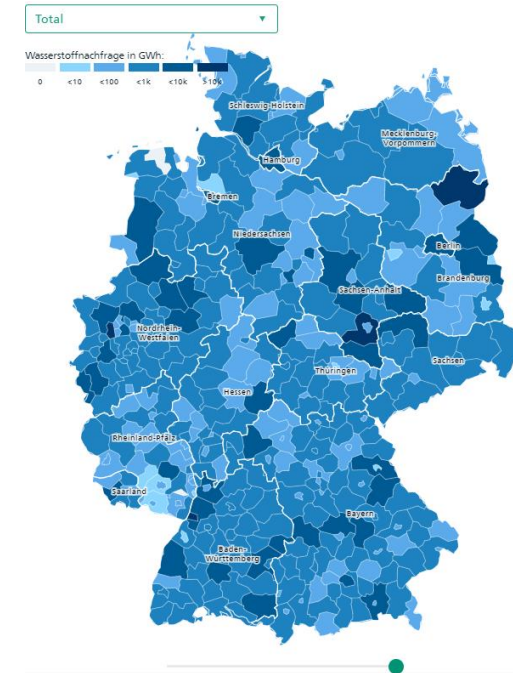


~150-250 TWh Wasserstoff

Unterschiedliche Energiesysteme und Strategien

- › Verbindung der großen Verbrauchszentren möglich über H₂-Transportnetz
- › Übergang auf breitere Nutzung erfordert Verteilnetz

Zusätzlich: H₂-Anwendung für die Prozesswärme in allen Branchen

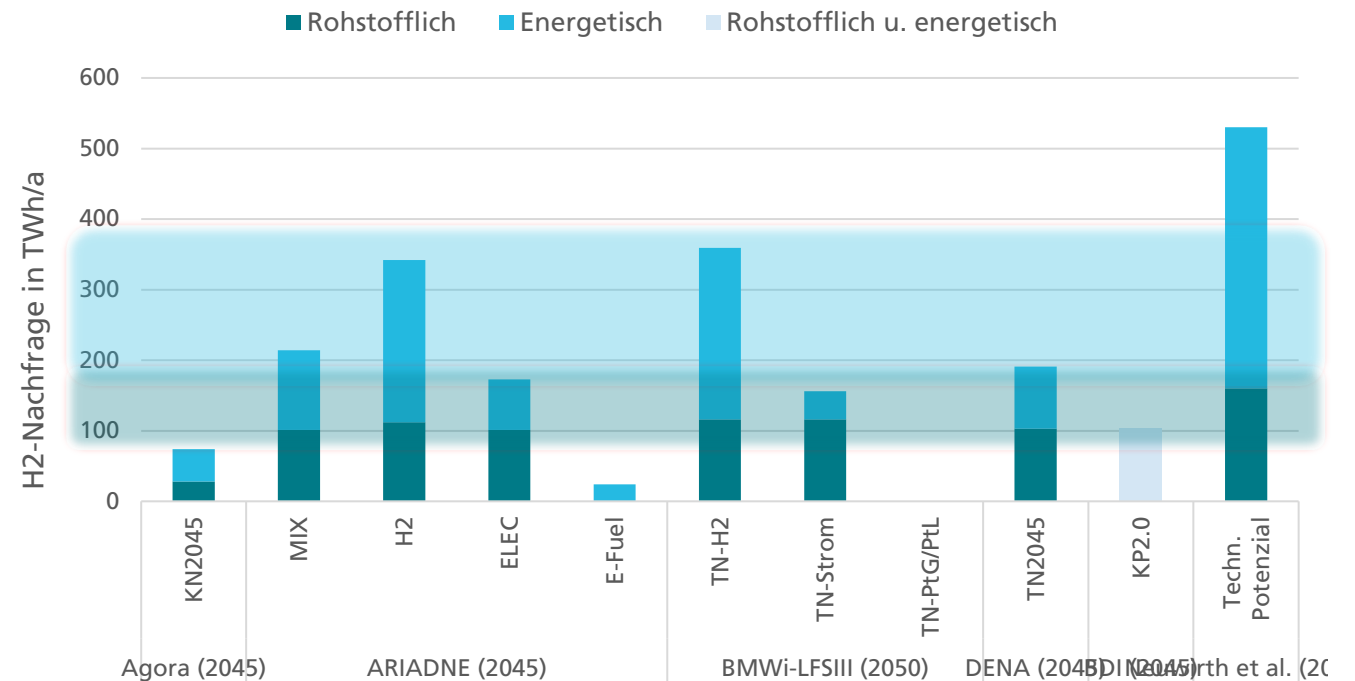


~250-500 TWh Wasserstoff

Quelle: Fraunhofer ISI

Was sagt der Studienvergleich zum zukünftigen Wasserstoffeinsatz in der Industrie?

- › **Rel. robuste stoffliche Nachfrage** (Bulk-Chemikalien): **~100TWh**
 - › *Agora KN2045 und E-Fuell/PtG-Szenarien niedrige H2-Nachfrage -> H2 in Importen von Kohlenwasserstoffen verborgen*
- › **Energetische Nachfrage variiert je nach Technologiefokus: ~50-250 TWh**
- › **Technisches Potenzial** für heutige Wirtschaftsstruktur **>500TWh**



Quelle: Neuwirth et al. (2022): [The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany](#)

Sind Technologien zum Einsatz von Wasserstoff verfügbar?

- › **Technology Readiness level (TRL)** zur Einschätzung der technischen Marktreife: TRL 9 = Verfügbar am Markt
- › Kombination mit dem technisch potenziell möglichen H₂-Einsatz
- › **Ergebnisse zeigen:**
 - › >200 TWh Wasserstoff können über verfügbare Technologien eingesetzt werden
 - › ~150 TWh benötigen den Schritt in die industrielle Skalierung
 - › ~100 TWh sind noch in der Pilotanwendung, technische Hürden scheinen überwindbar

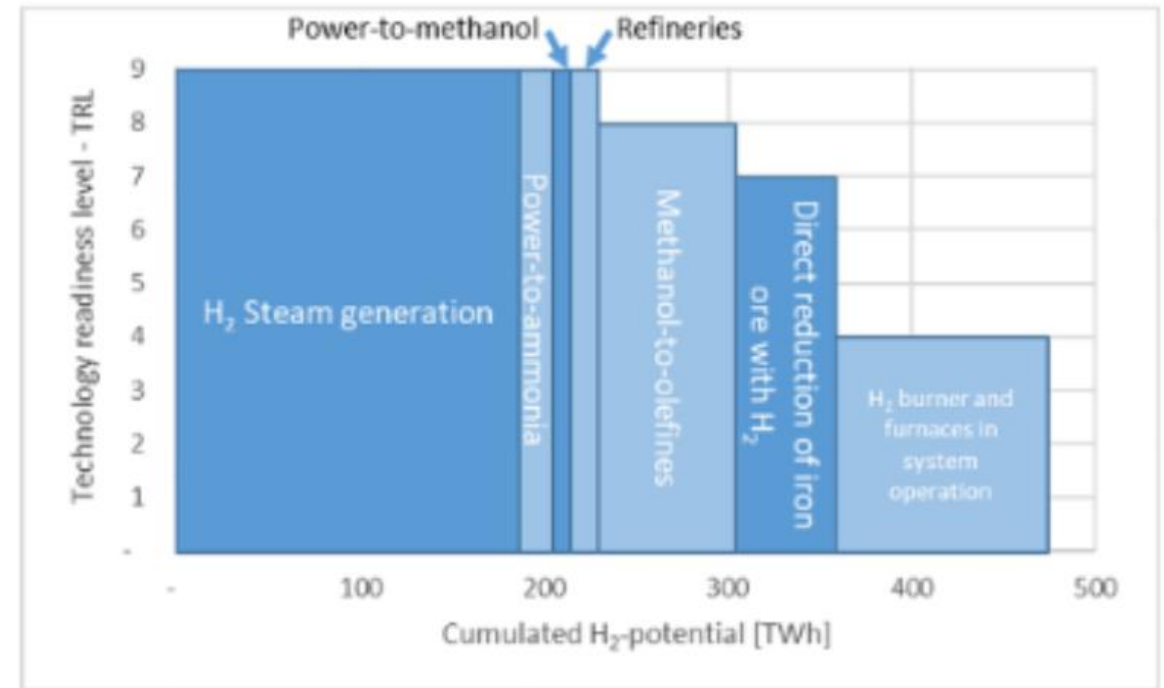


Fig. 7. Hydrogen potentials of the bottom-up and top-down analysis depending on the TRL. Instead of TRL ranges, the lower estimated TRL by technology is shown.

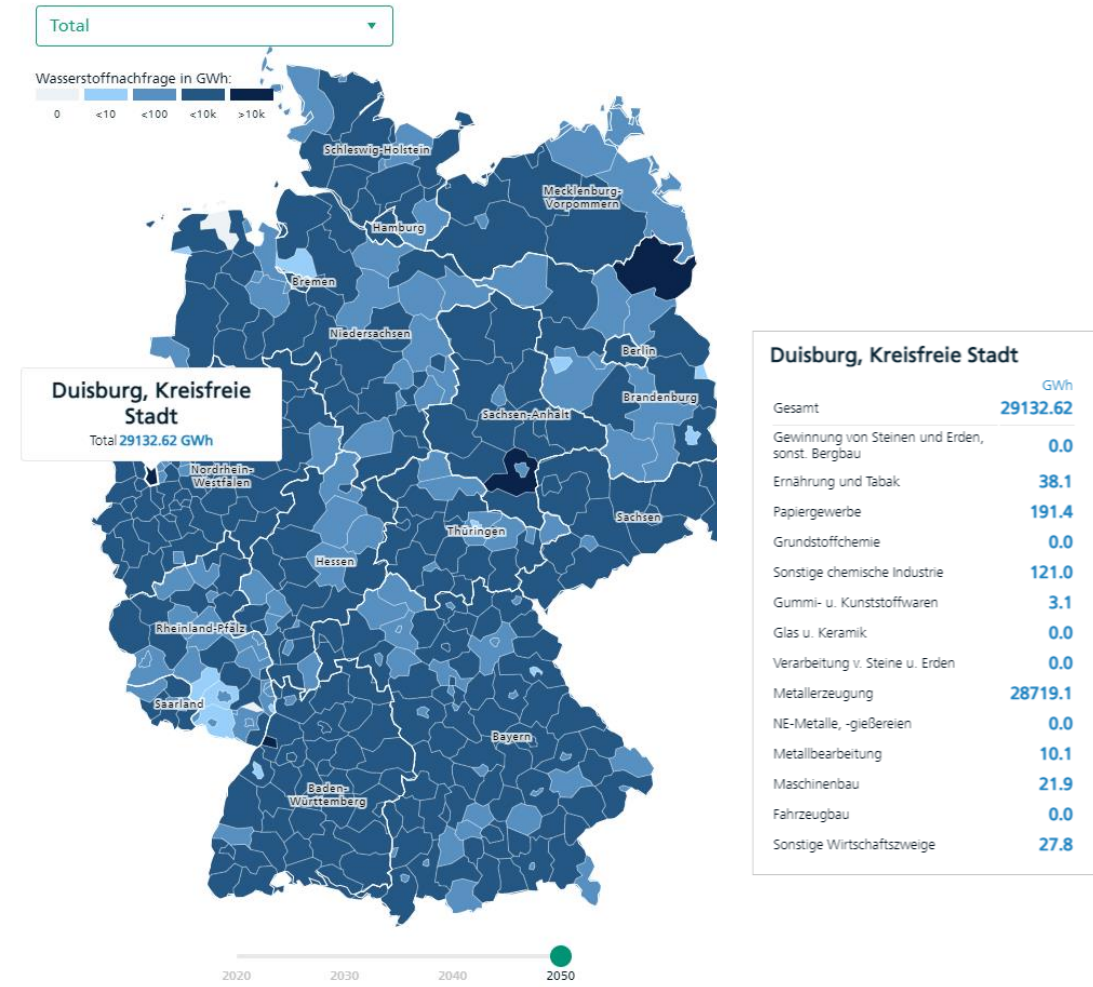
Quelle: Neuwirth et al. (2022): [The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany](#)

Schlussfolgerungen

- › Wasserstoff kann eine wichtige Rolle für die Dekarbonisierung der Industrie spielen!
- › Die **technische Machbarkeit** ist für die meisten Prozesse nachgewiesen und Technologien werden in den kommenden Jahren verfügbar sein
 - › Skalierung, Validierung und Wirtschaftlichkeit sind entscheidend
- › Alleine der **Einsatz in den etwa 20 großen Standorten der Stahl- und Chemieindustrie** birgt eine sehr hohe Nachfrage nach Wasserstoff und kann die Grundlage für eine Wasserstoff-Transportinfrastruktur in Deutschland darstellen
 - › Priorisierung beim Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft?
- › Die Ausweitung auf andere Sektoren und verteilte **Anwendungen der Prozesswärme** verlangt nochmals große Mengen Wasserstoff sowie den Aufbau eines engmaschigeren Verteilnetzes

Der Online Datensatz bietet noch mehr

- Auswahl einzelner Landkreise und kreisfreier Städte (Hier: Beispiel Duisburg)
- Auswahl einzelner Branchen
- Auswahl anderer Jahre: 2030, 2040 und 2050



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Kontakt: Tobias.Fleiter@isi.fraunhofer.de

Material zur weiteren Vertiefung

- Ariadne Szenariobericht: <https://ariadneprojekt.de/themen/szenarien-pfade/>
- Langfristszenarien III Industriebericht: <https://www.langfristszenarien.de/>
- Neuwirth et al. (2022): [The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany](#)

