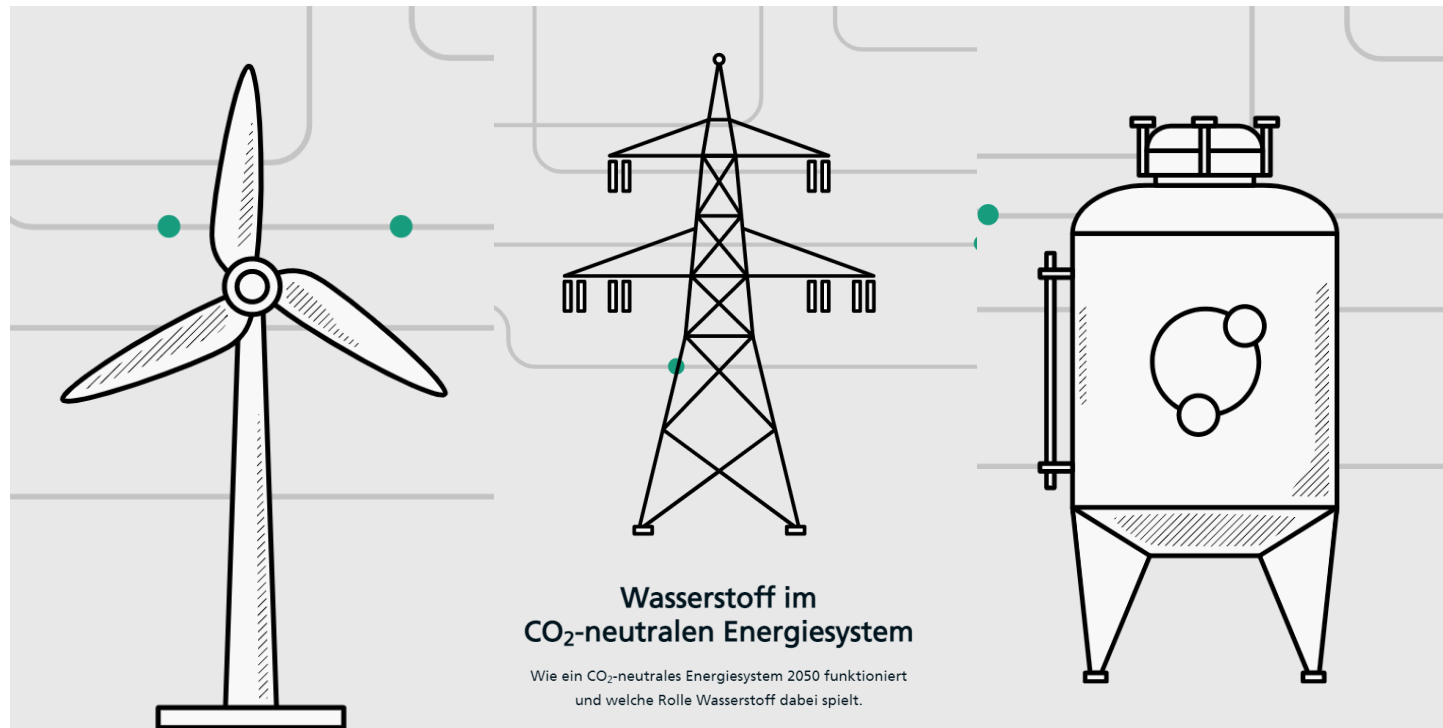


# WASSERSTOFF IM CO<sub>2</sub>-NEUTRALEN ENERGIESYSTEM

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

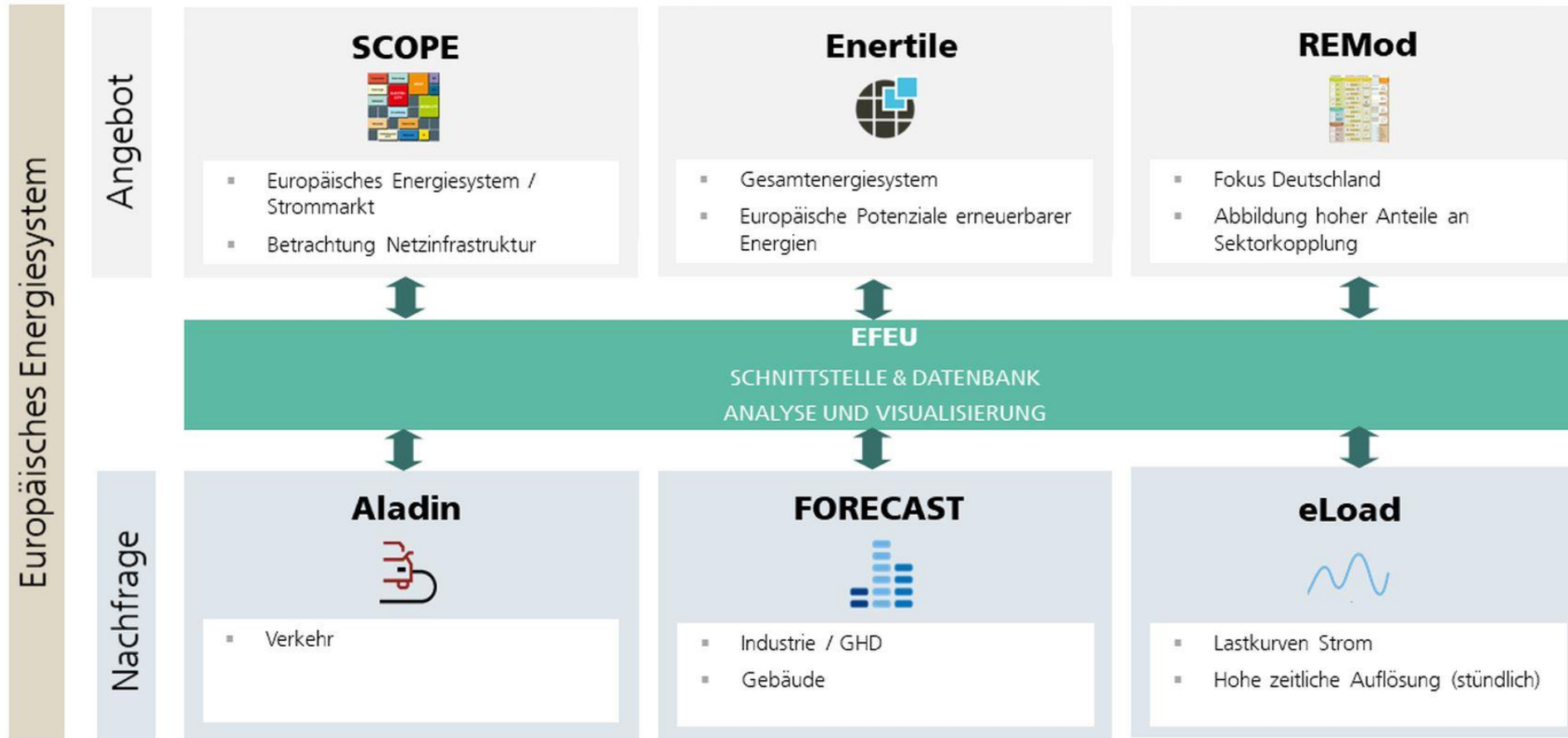
- Fraunhofer ISI,
- Fraunhofer IEE,
- Fraunhofer ISE und
- Fraunhofer IEG.

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



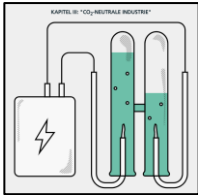
# Systemmodellierung von Fraunhofer CINES als Grundlage



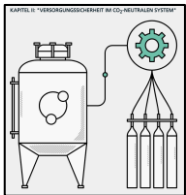
# AGENDA



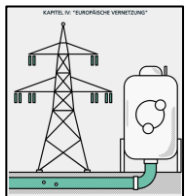
- Charlotte Senkpiel:  
Kapitel I: Das Energiesystem im Wandel



- 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

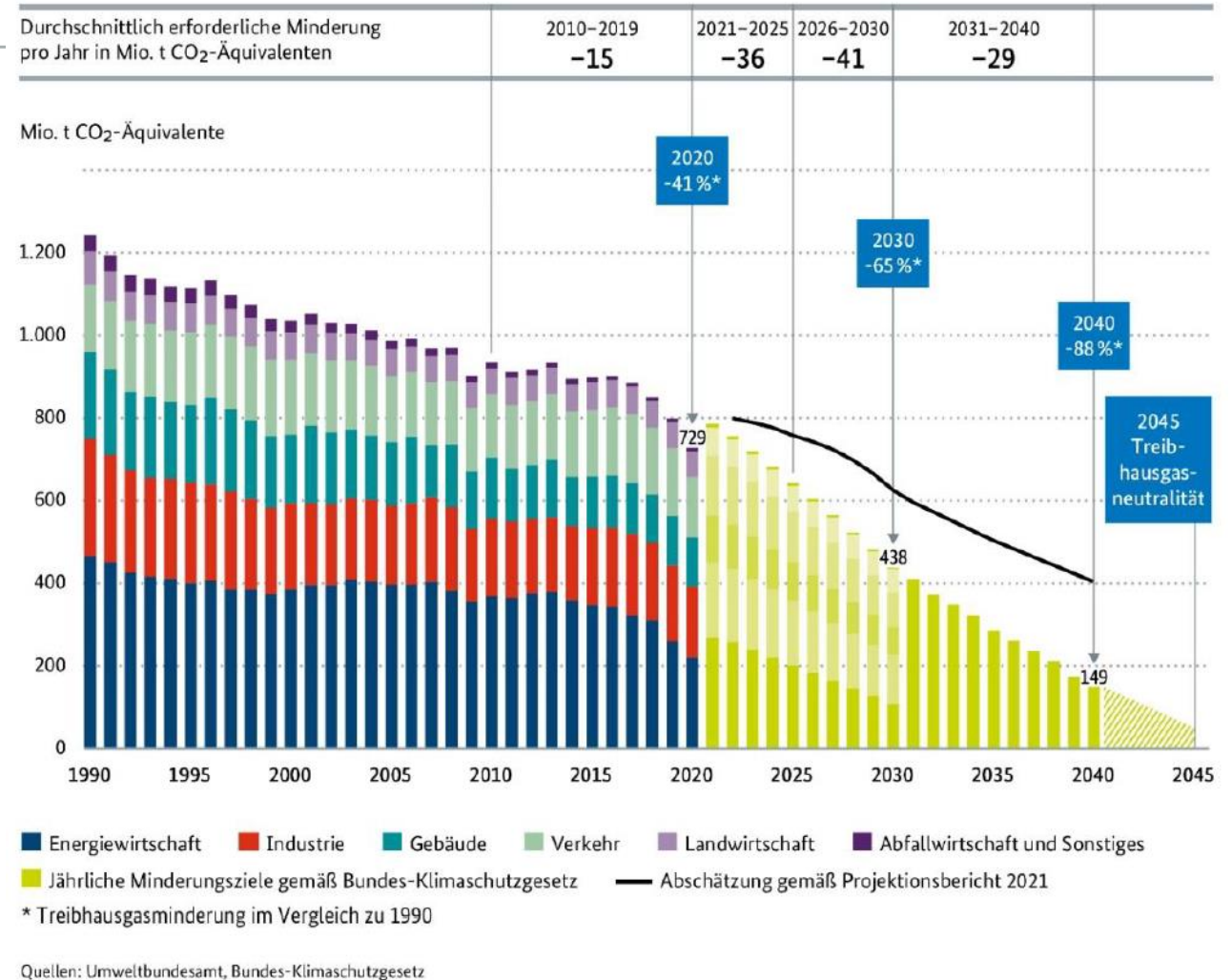
Freiburg, 20. Januar 2022

[www.ise.fraunhofer.de](http://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.

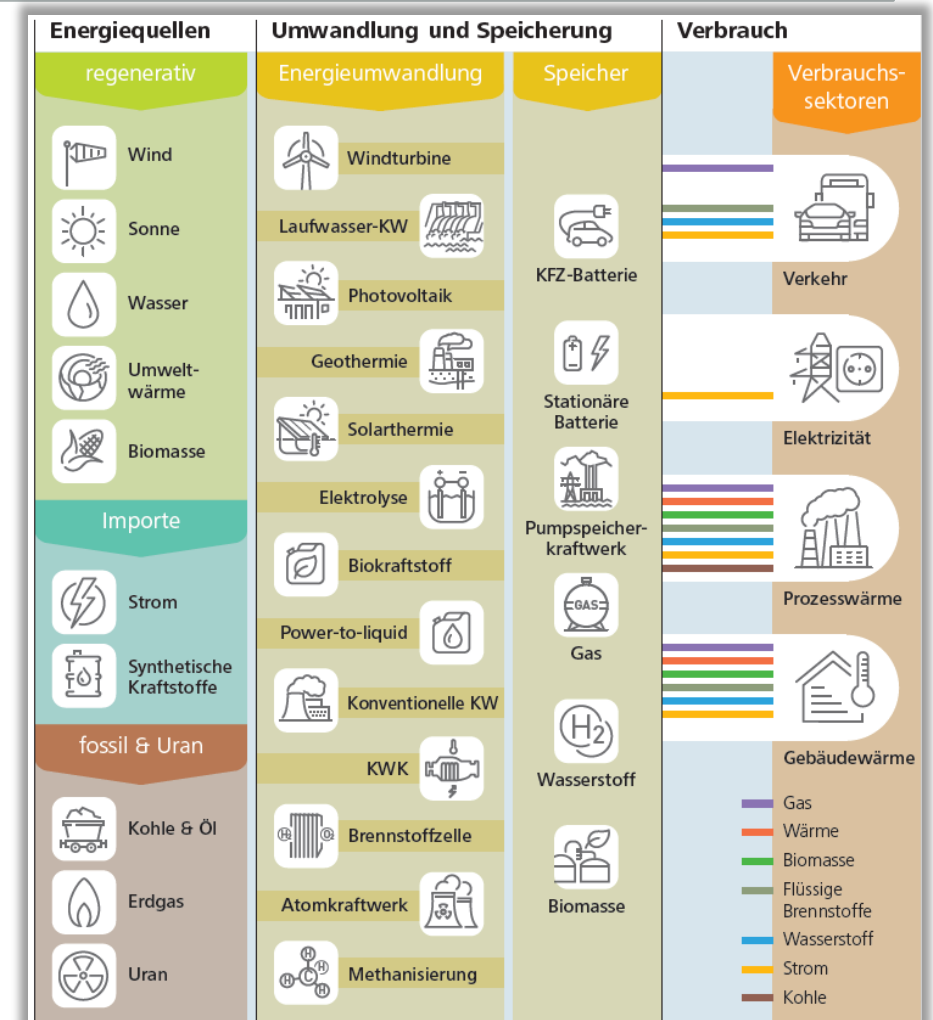
Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland



# Systemanalyse – Methodik

## Regenerative Energien Modell REMod

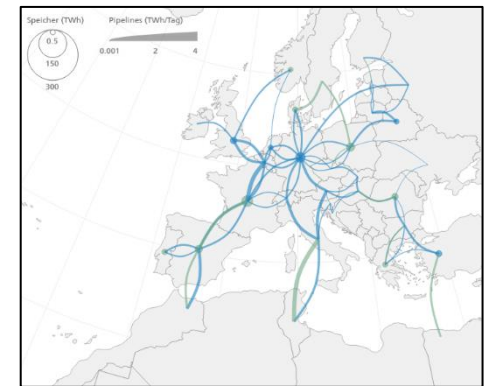
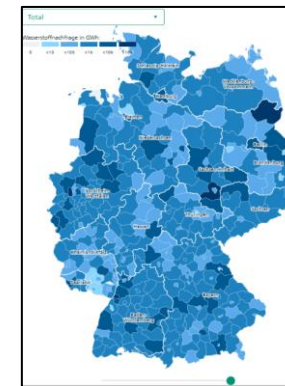
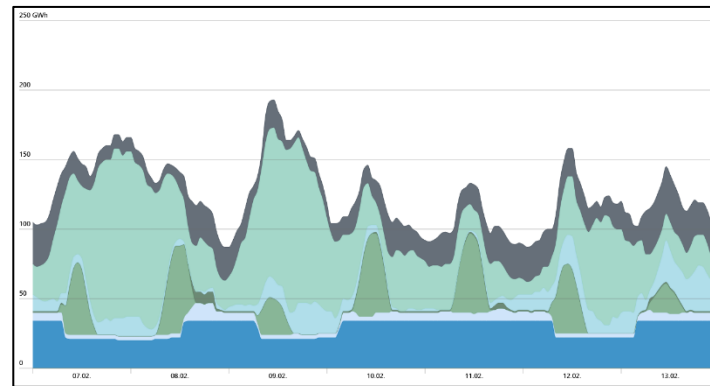
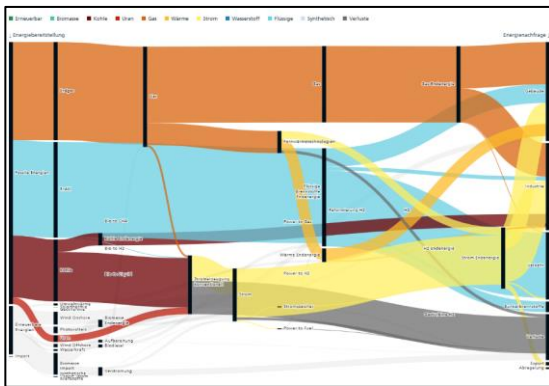
- **Modell zur Simulation und Optimierung der Entwicklung nationaler Energiesysteme**
  - Einbeziehung aller Verbrauchssektoren und Energieträger
  - Minimierung der Transformationskosten
  - Stundengenaue Modellierung



# Erkundungstour der Visualisierung



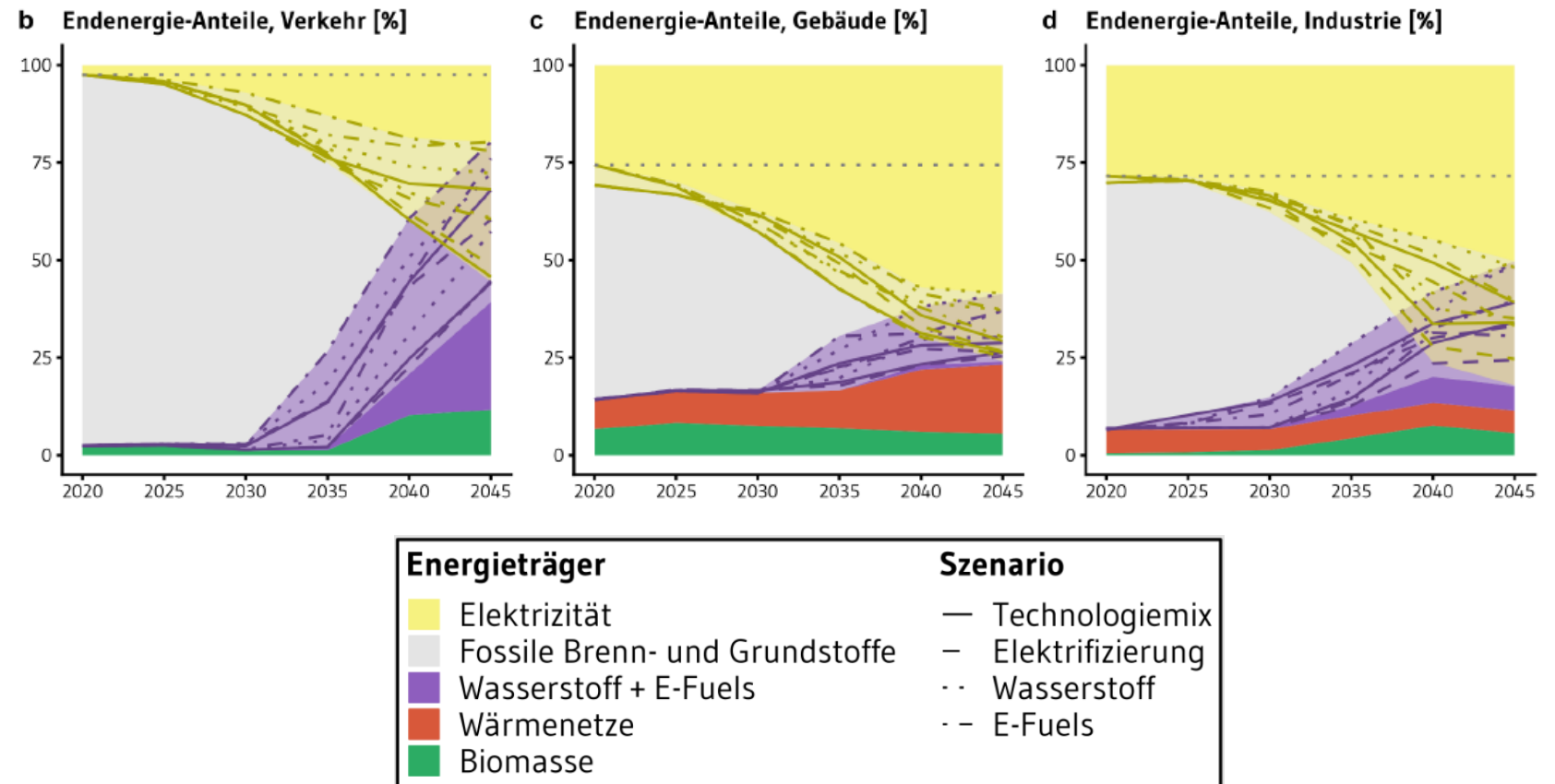
<https://fraunhofer.wasserstoff-story.de/>





# 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



# 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](#)

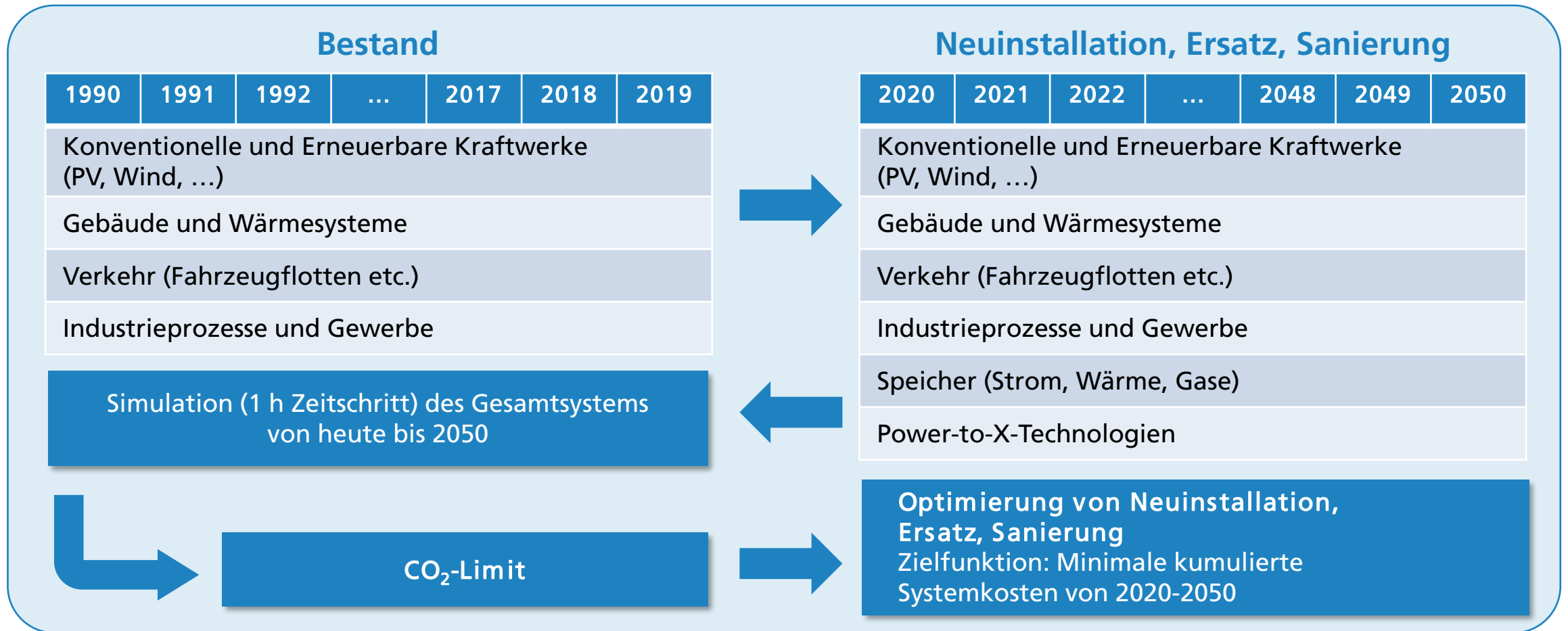
Kontakt:  
charlotte.senkpiel@ise.fraunhofer.de

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**



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

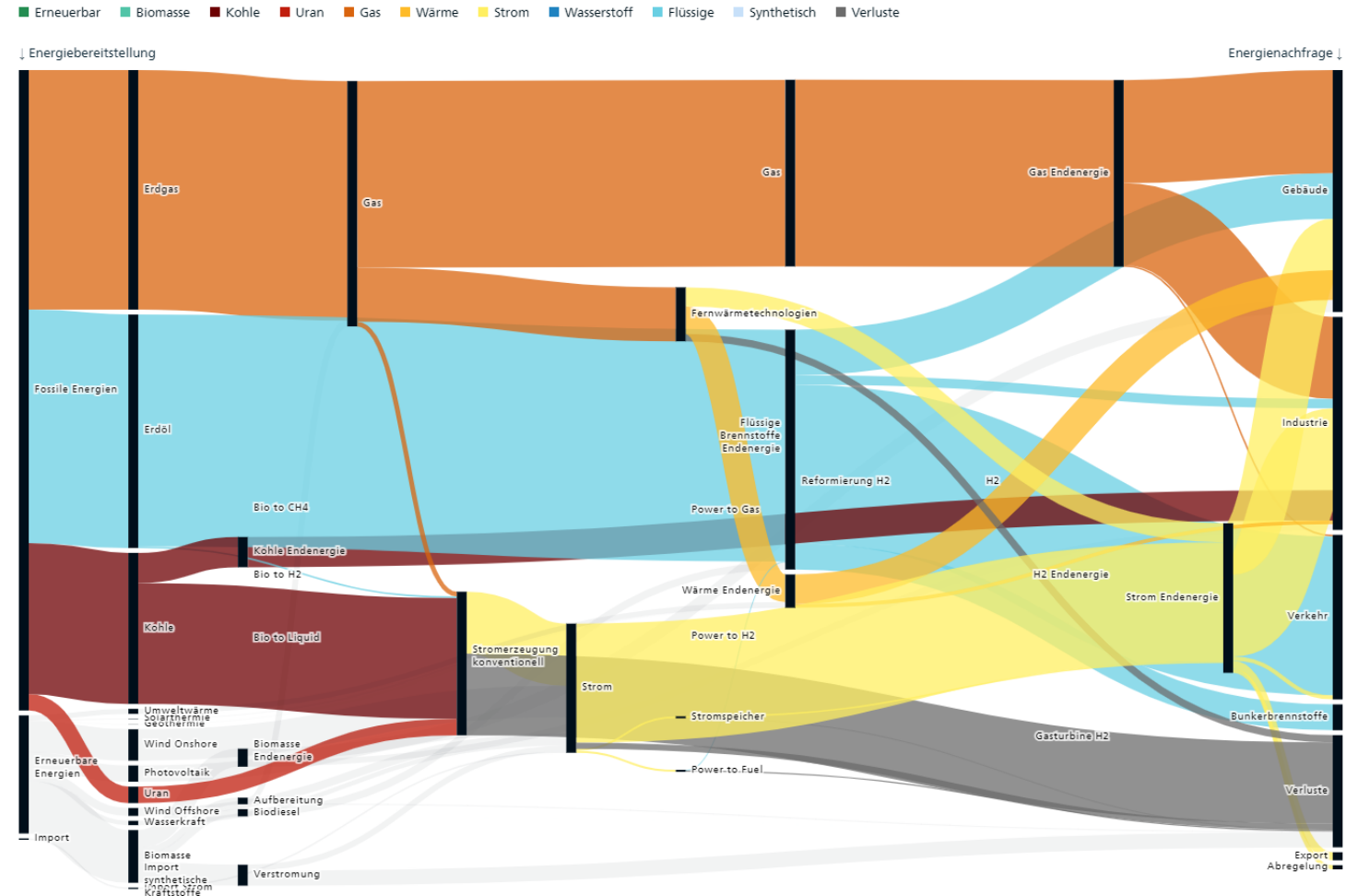
# Systemanalyse – Methodik



# Das Energiesystem im Wandel

## Die heutigen Energieflüsse

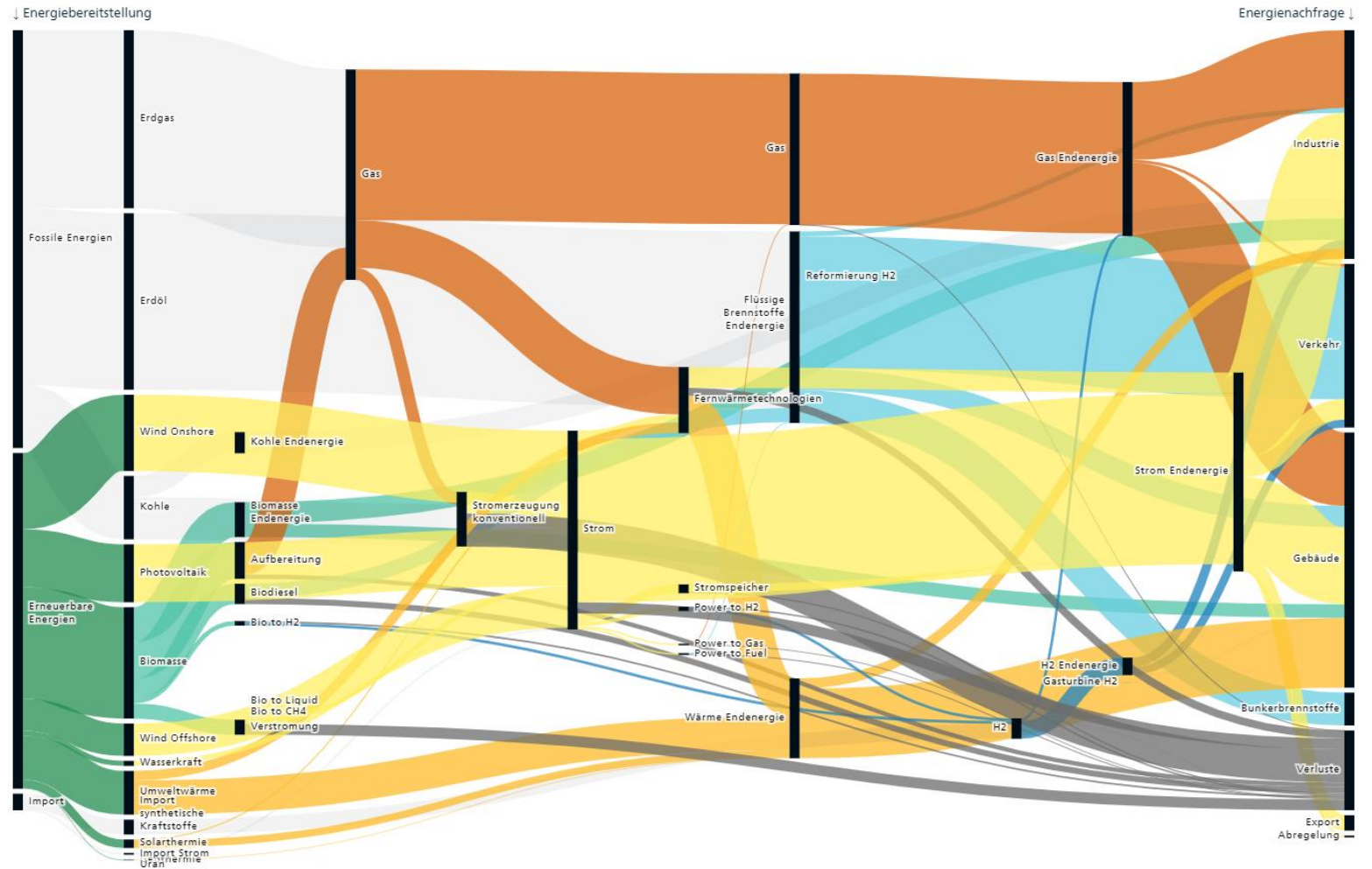
- Fossile Energieträger dominieren das heutige Energiesystem. An den knapp 12.200 PJ Primärenergieverbrauch im Jahr 2021 lag der Anteil der Erneuerbaren bei 16%.
- Die Wandlungseffizienz liegt heute bei ca. 73%.
- Klimaneutralität muss sowohl auf der Bereitstellungs- sowie der Anwendungsseite realisiert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



# Das Energiesystem im Wandel

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

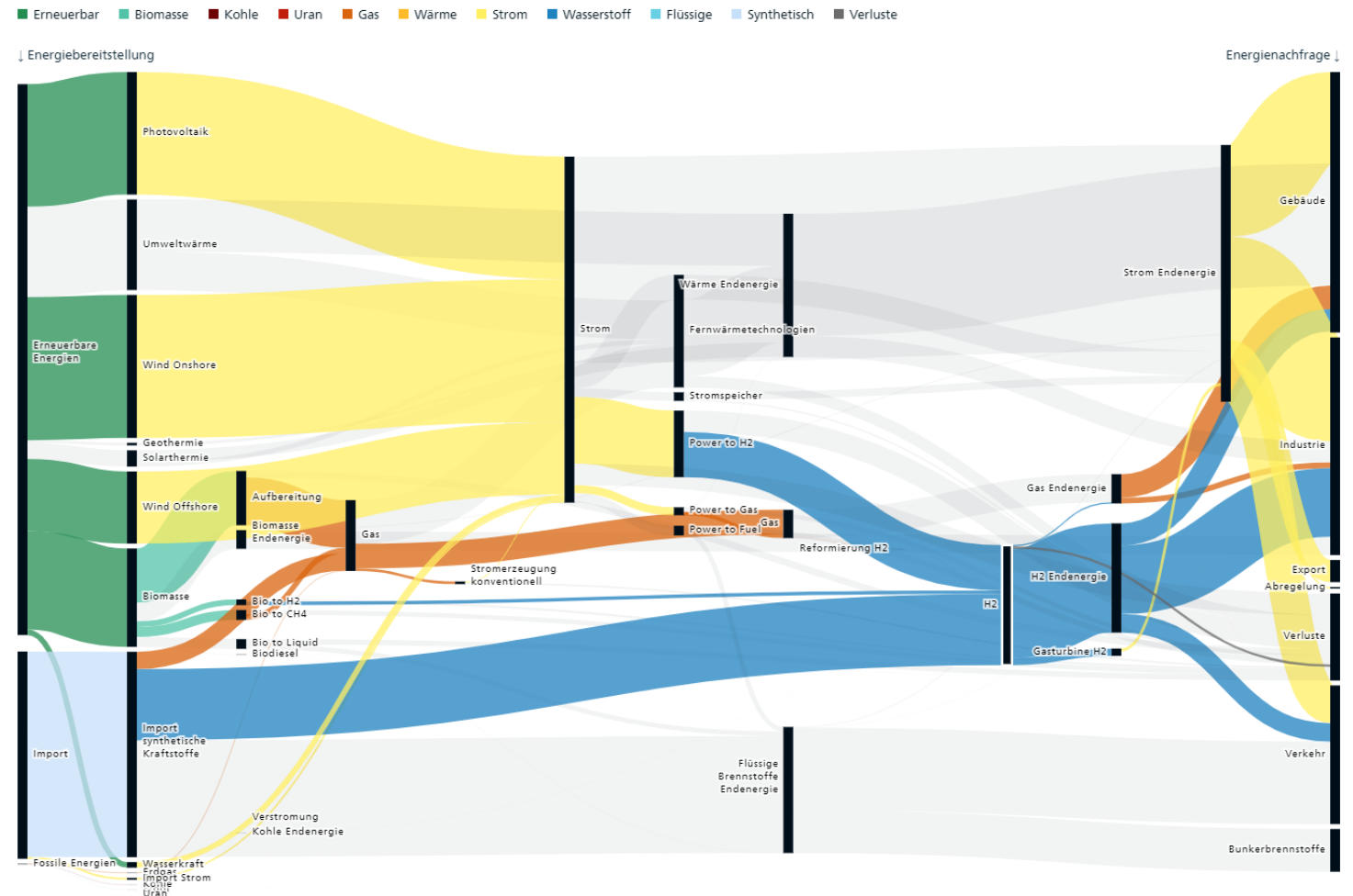
- Der Anteil Erneuerbarer an der Primärenergiebereitstellung ist deutlich erhöht.
- Die Wandlungseffizienz hat sich gesteigert.
- Die direkte Elektrifizierung durch Strom (PV, Wind) sowie die Verwendung von Umweltwärme und Biomasse hat an Bedeutung gewonnen.
- Der synthetische Energieträger Wasserstoff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

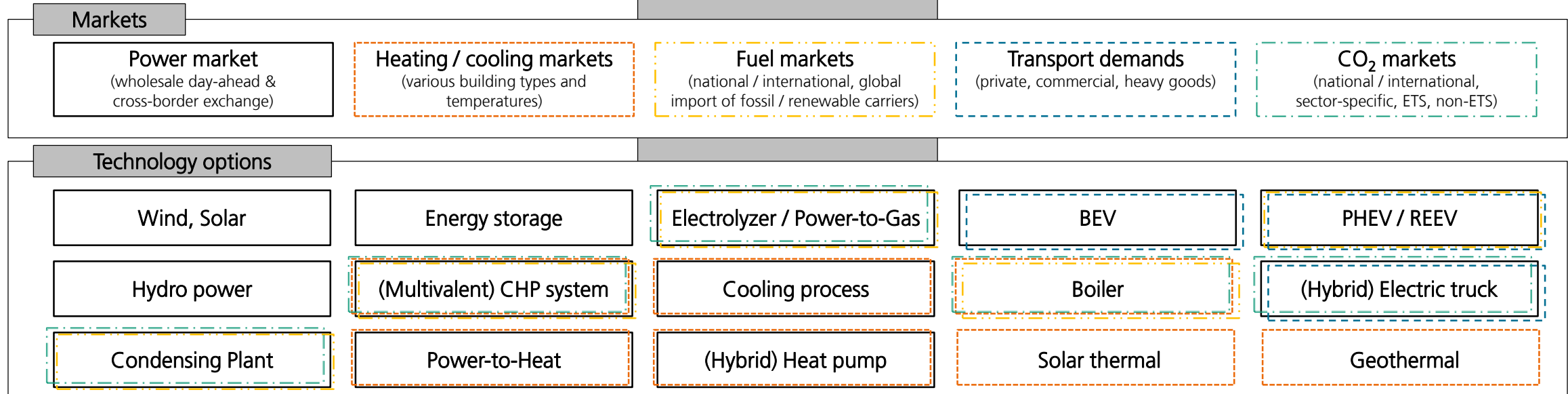
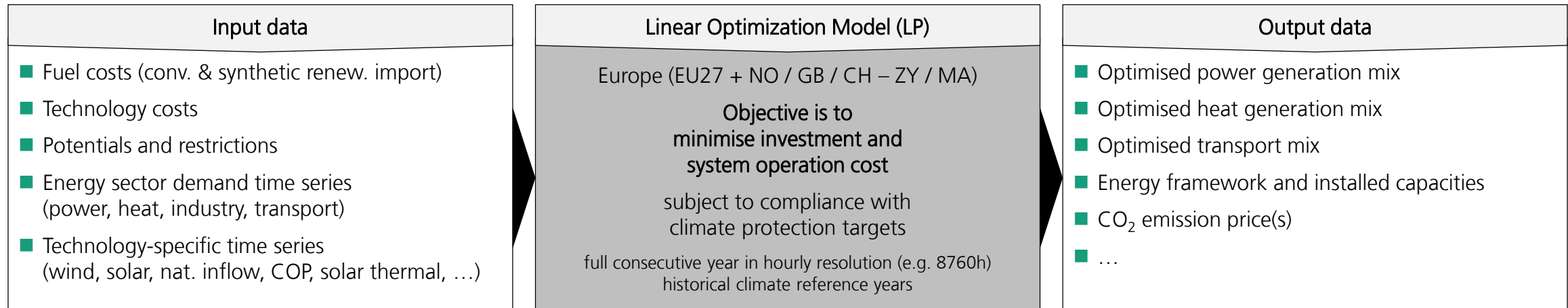
---

# Agenda

---

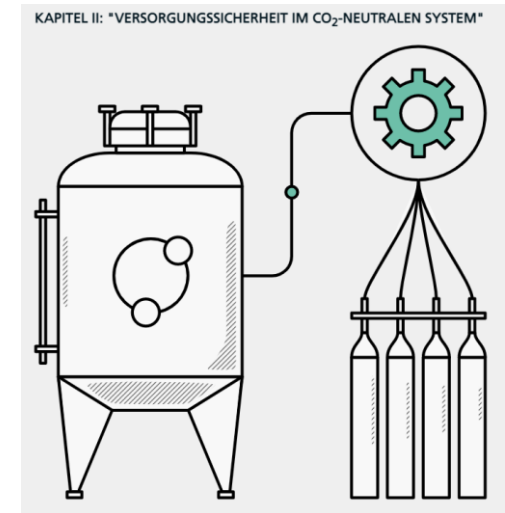
- Versorgungssicherheit im CO<sub>2</sub>-neutralen System mit Fokus auf Strom
  - Das Modell „SCOPE Scenario Development (SCOPE SD)“
  - Randbedingungen und Ergebnisse der Modellierung
  - Fluktuierende Erzeuger, Dunkelflauten und die Rolle von Elektrolyseuren
- Europäische Vernetzung und Rückkopplung 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<sub>H<sub>2</sub></sub>, 124,40 € / MWh<sub>PtL-Import</sub>, 106,30 € / MWh<sub>PtCH<sub>4</sub>-Import</sub>
  - Opportunität zur europäischen PtX-Erzeugung
- Industrieverbräuche und fixe Emissionen von FORECAST (Fraunhofer ISI)
- Kalkulatorischer inflationsbereinigter Zinssatz von 6%, reale Kosten

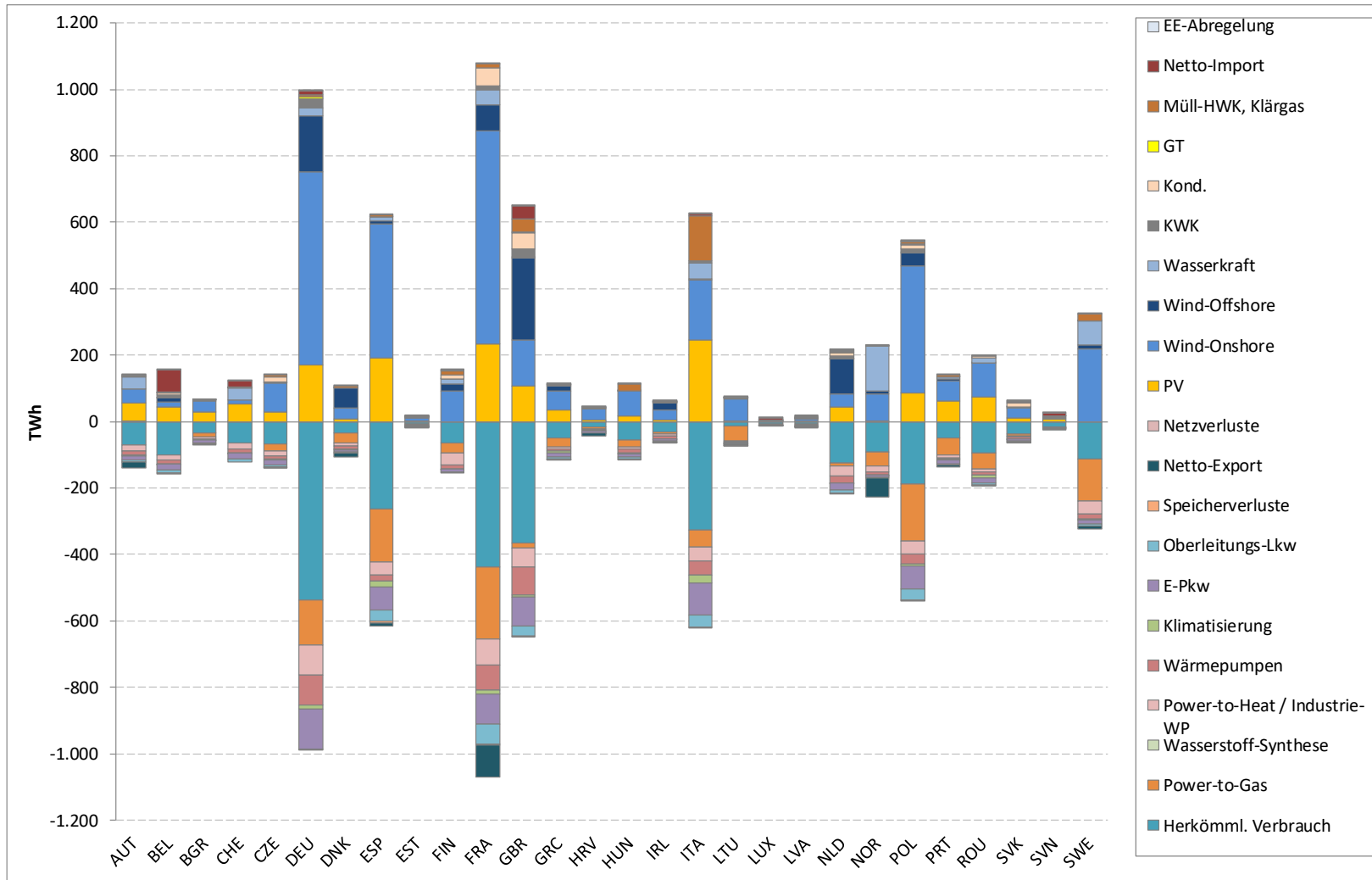


# Exkurs: Die europäische Gasbilanz in versch. Szenarien in 2050 (ohne int. Verkehr)

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 H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/PtL, desto mehr werden sie auf der Verbrauchs-Seite eingesetzt (1: 1.099 TWh → Sz.2: 1.254 TWh), jedoch reduziert eine Steigerung des H<sub>2</sub>-Importpreises nur geringfügig den PtX-Bedarf (1: 1.099 TWh → Sz.3: 1.079 TWh)
- H<sub>2</sub>-Import von außerhalb Europas (per Pipeline aus der MENA-Region) findet nur bei einem H<sub>2</sub>-Preis von 72,50 € (Szenario 2) statt

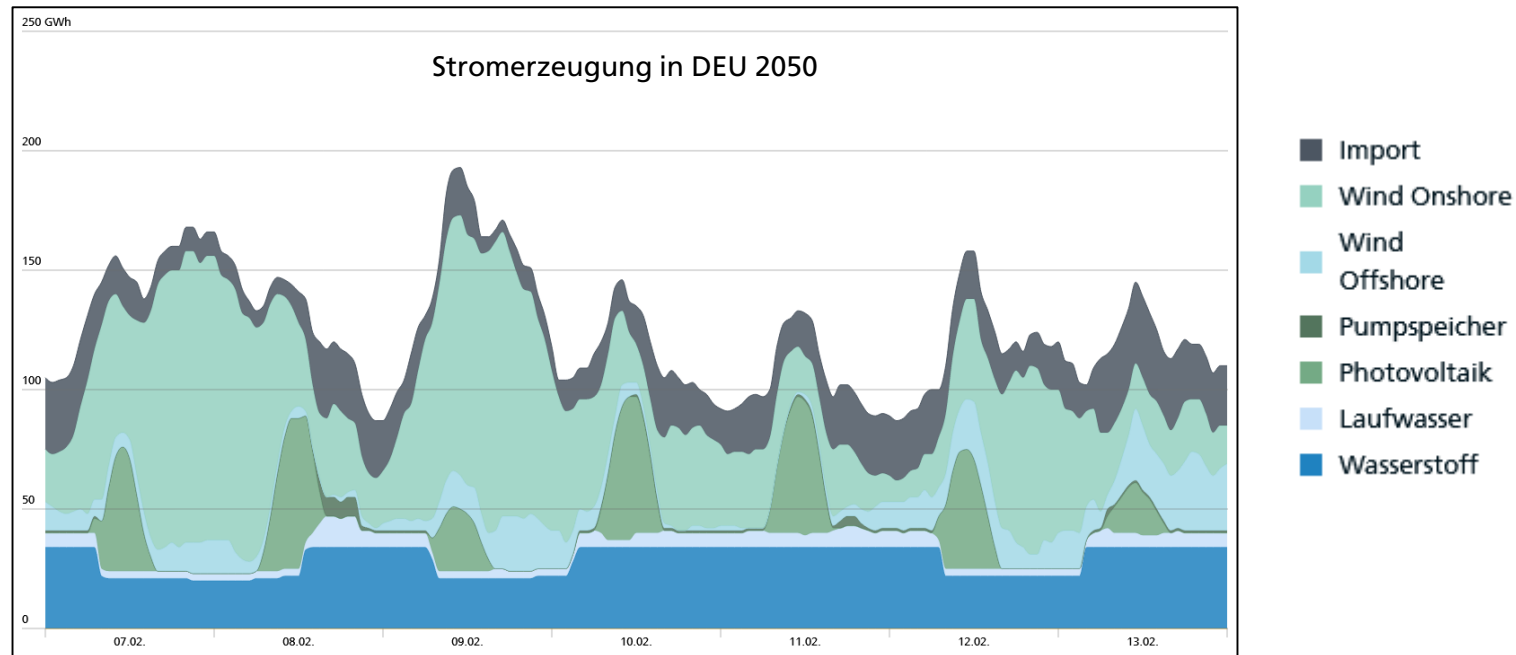
# Die europäische Strombilanz in 2050



## Schlussfolgerungen:

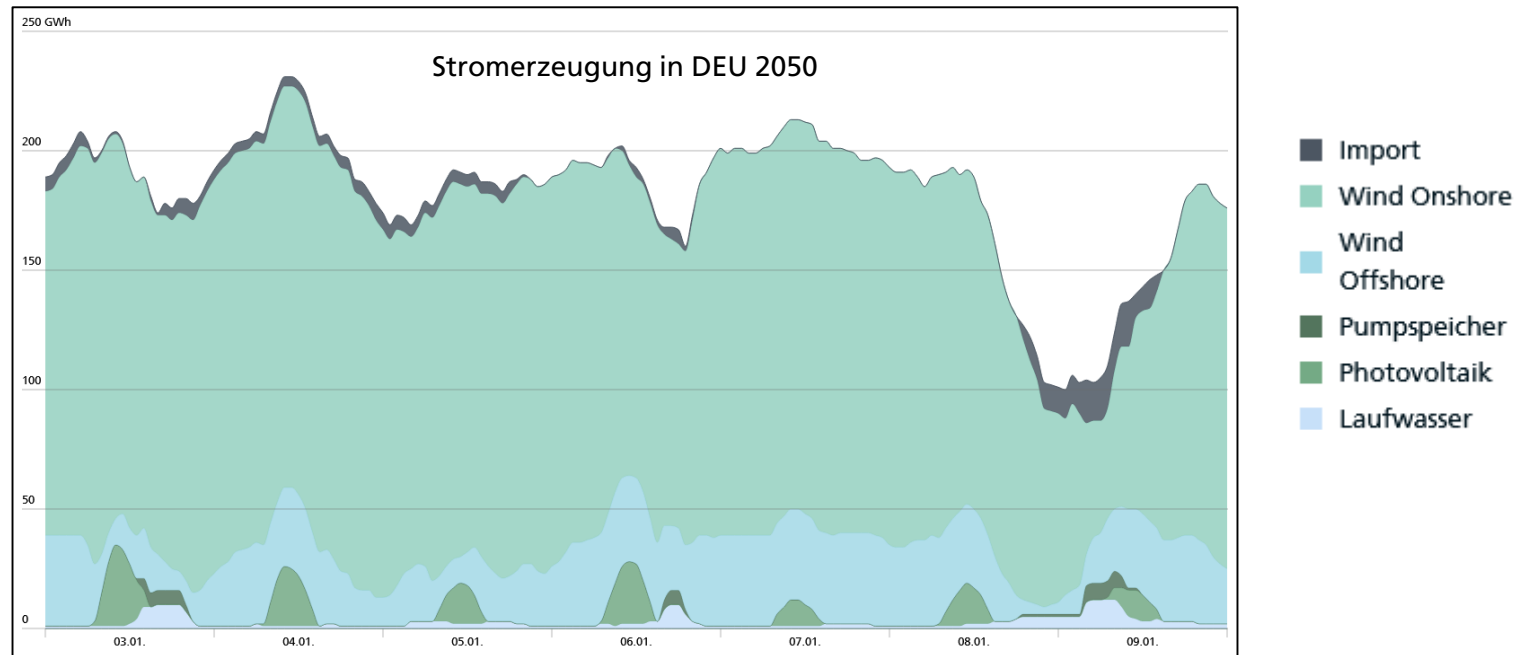
- Je geringer der H<sub>2</sub>-Import-Preis, desto höher die Stromproduktion in zentralen thermischen Kraftwerken
- Je geringer der H<sub>2</sub>-Import-Preis, desto geringer die heimische H<sub>2</sub>-Produktion in Europa
- Bedingt durch diese beiden Punkte sinkt die Stromerzeugung aus Wind und PV, je niedriger der H<sub>2</sub>-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

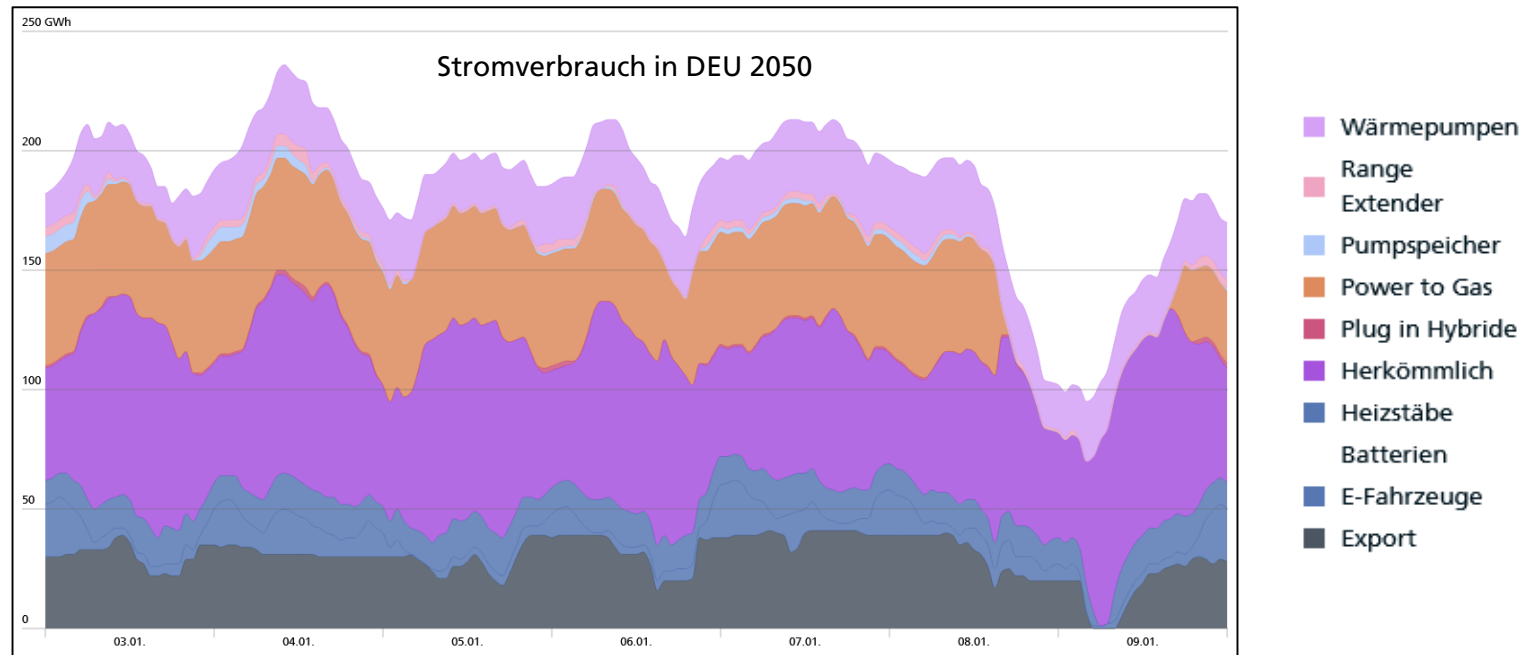


- In Zeiten mit hoher Einspeisung aus Wind und PV besteht vermeintlich die Gefahr, dass große Mengen abgeregelt werden müssen
- Die Berechnungen zeigen: Durch den Einsatz flexibler Verbraucher wie bspw. H<sub>2</sub>-Elektrolyseure oder Elektrodenkessel/Elektroautos kann dies verhindert werden (siehe nächste Folie).

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

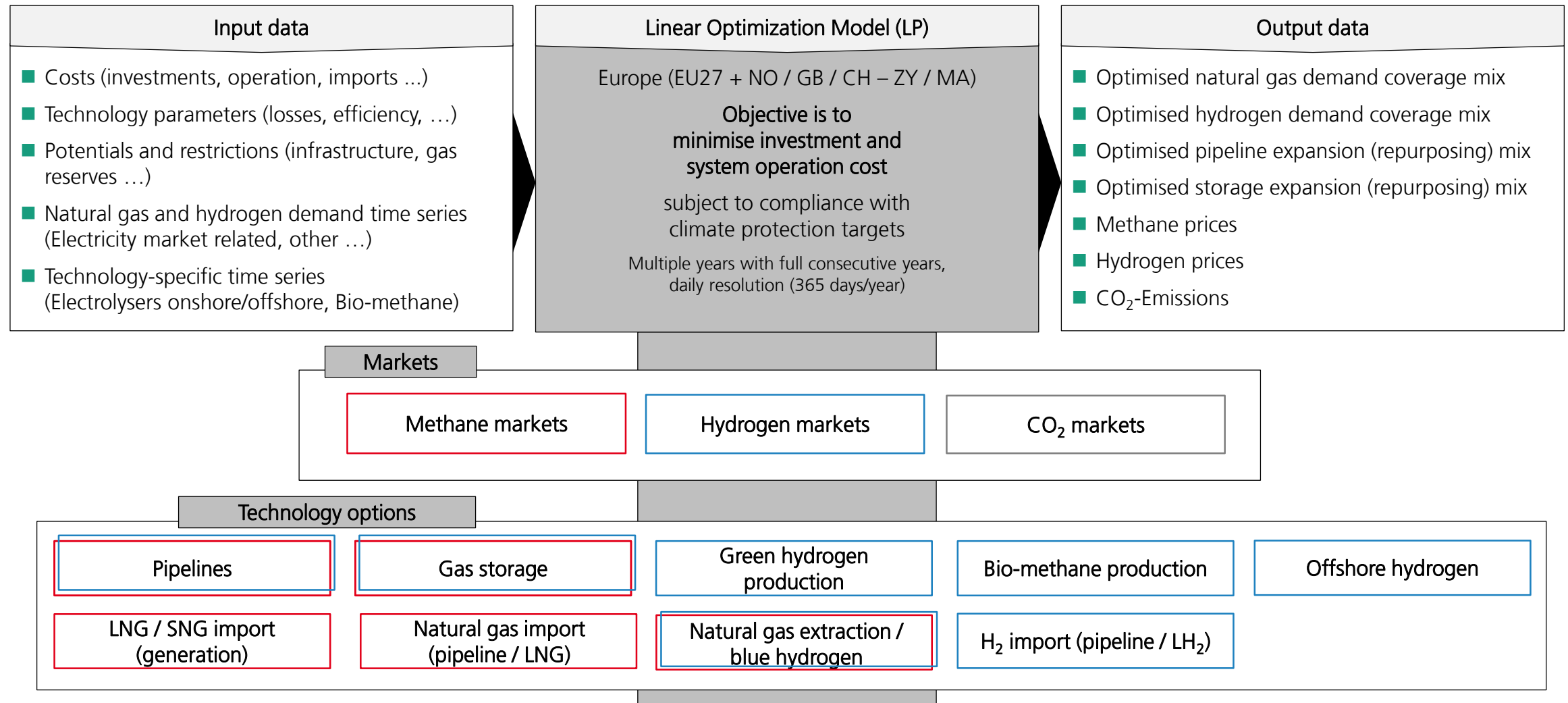


# Elektrolyseure dienen als flexible Stromverbraucher

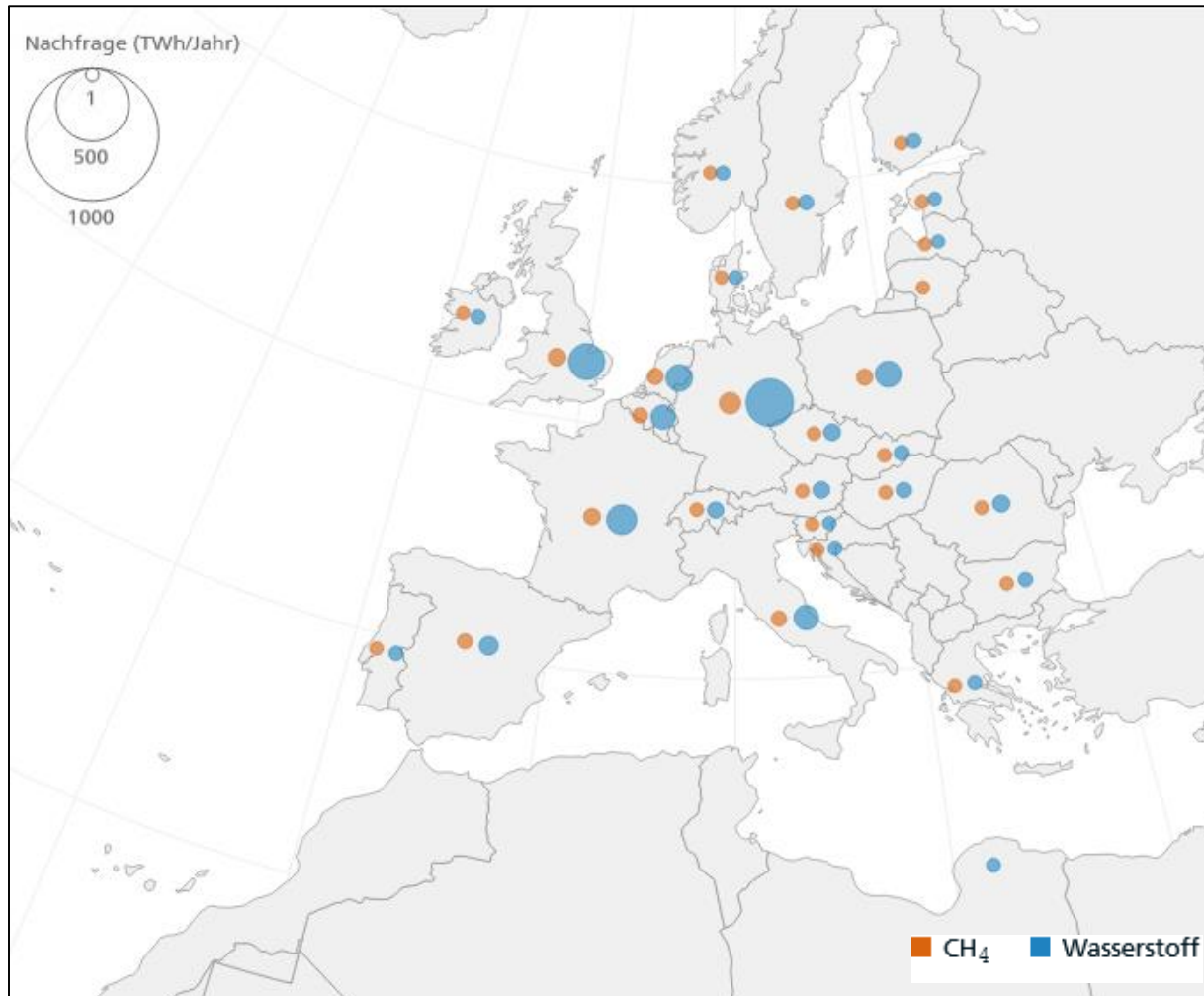


- H<sub>2</sub>-Elektrolyseure können ihre Erzeugung flexibel an das Stromangebot anpassen
- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht können geringe Strompreise effizient ausgenutzt werden. Gleichzeitig trägt die Elektrolyse zur Stabilisierung der Marktwertfaktoren von Wind und PV und damit zu deren Refinanzierung bei.
- Aus Sicht des Energiesystems erfolgt ein wettbewerbsfähiger Ausbau und eine effiziente Nutzung des zur Verfügung stehenden Stroms.

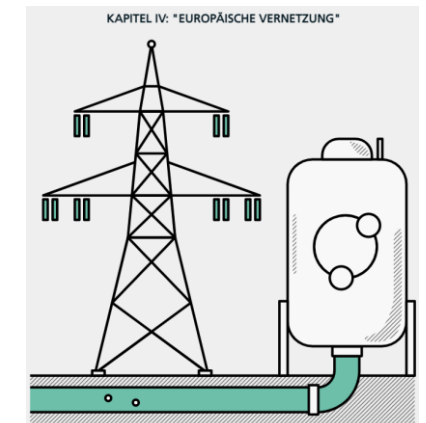
# Fokus Gas: European Infrastructure Gas Market Model (ENIGMA)



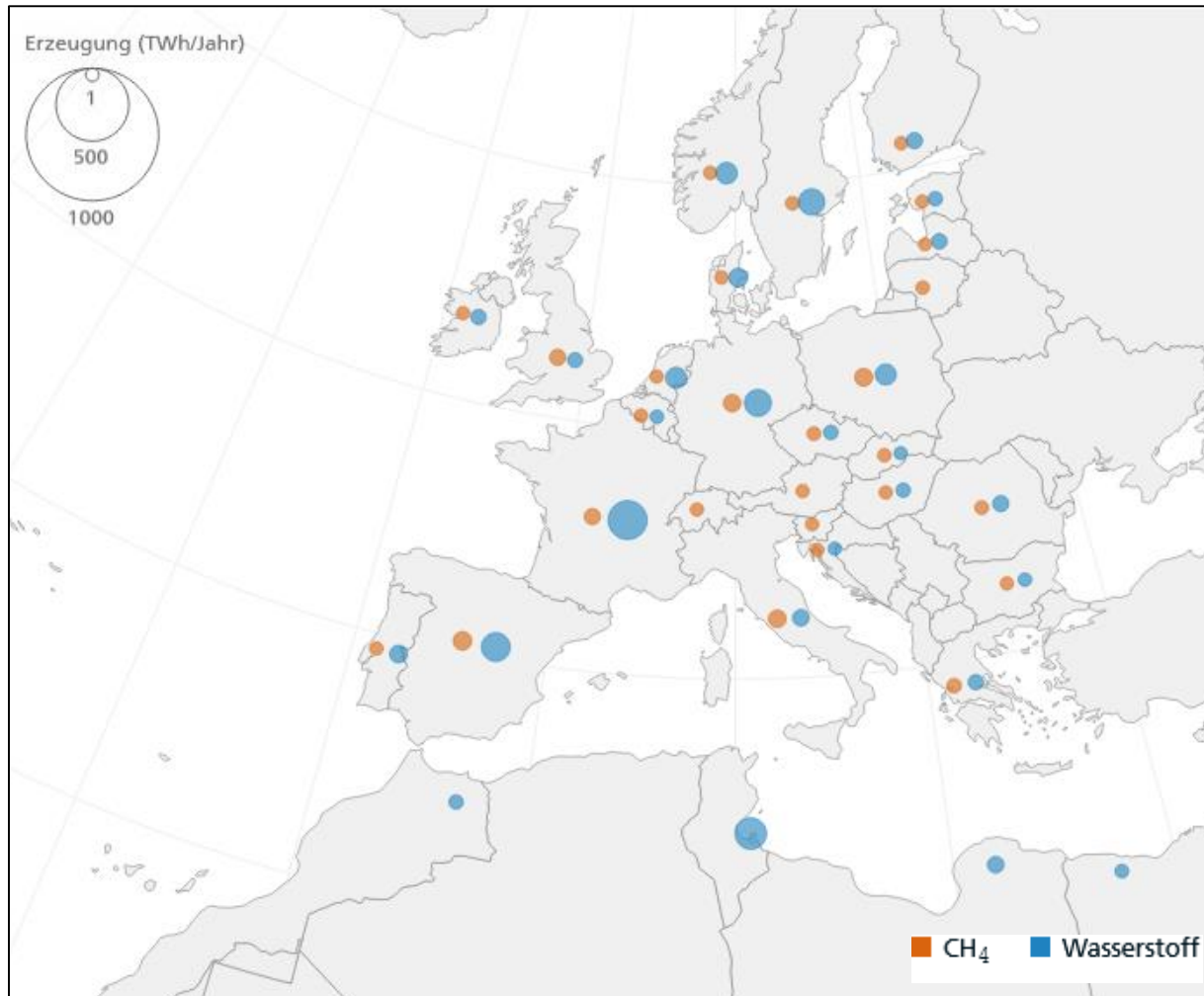
# Nachfrage nach reg. Methan und Wasserstoff im Jahr 2050



- 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.

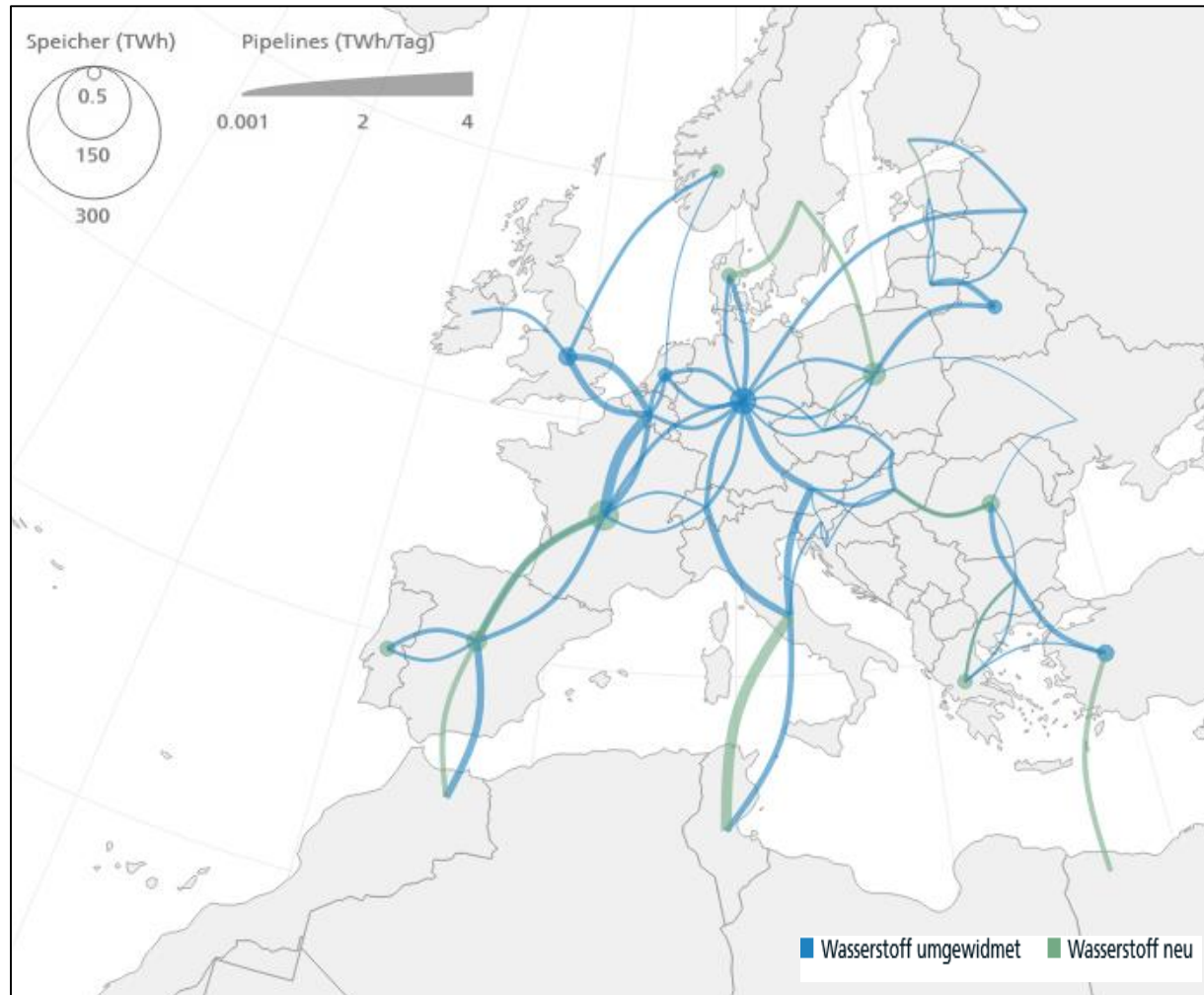


# Produktion von reg. Methan und Wasserstoff im Jahr 2050



- 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 CO<sub>2</sub>-neutrales Energiesystem bis 2045/2050 ist ein realistisches Ziel
- Die Versorgungssicherheit ist jederzeit durch H<sub>2</sub>-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

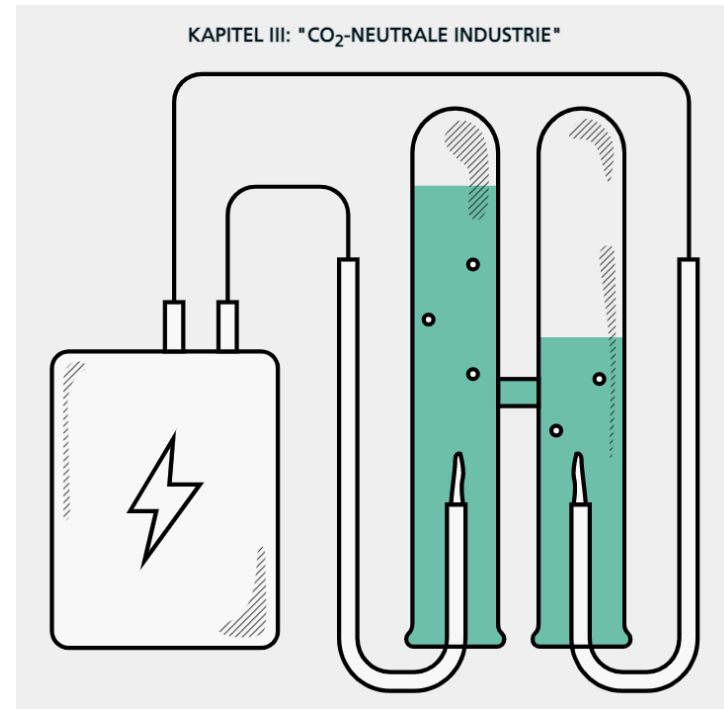
Königstor 59 | 34119 Kassel  
Telefon +49 561 7294-1252 | Fax +49 561 7294-260  
richard.schmitz@iee.fraunhofer.de

---

# KAPITEL III: CO<sub>2</sub>-NEUTRALE INDUSTRIE

Tobias Fleiter, Pia Manz, Marius Neuwirth, Matthias Rehfeldt

---



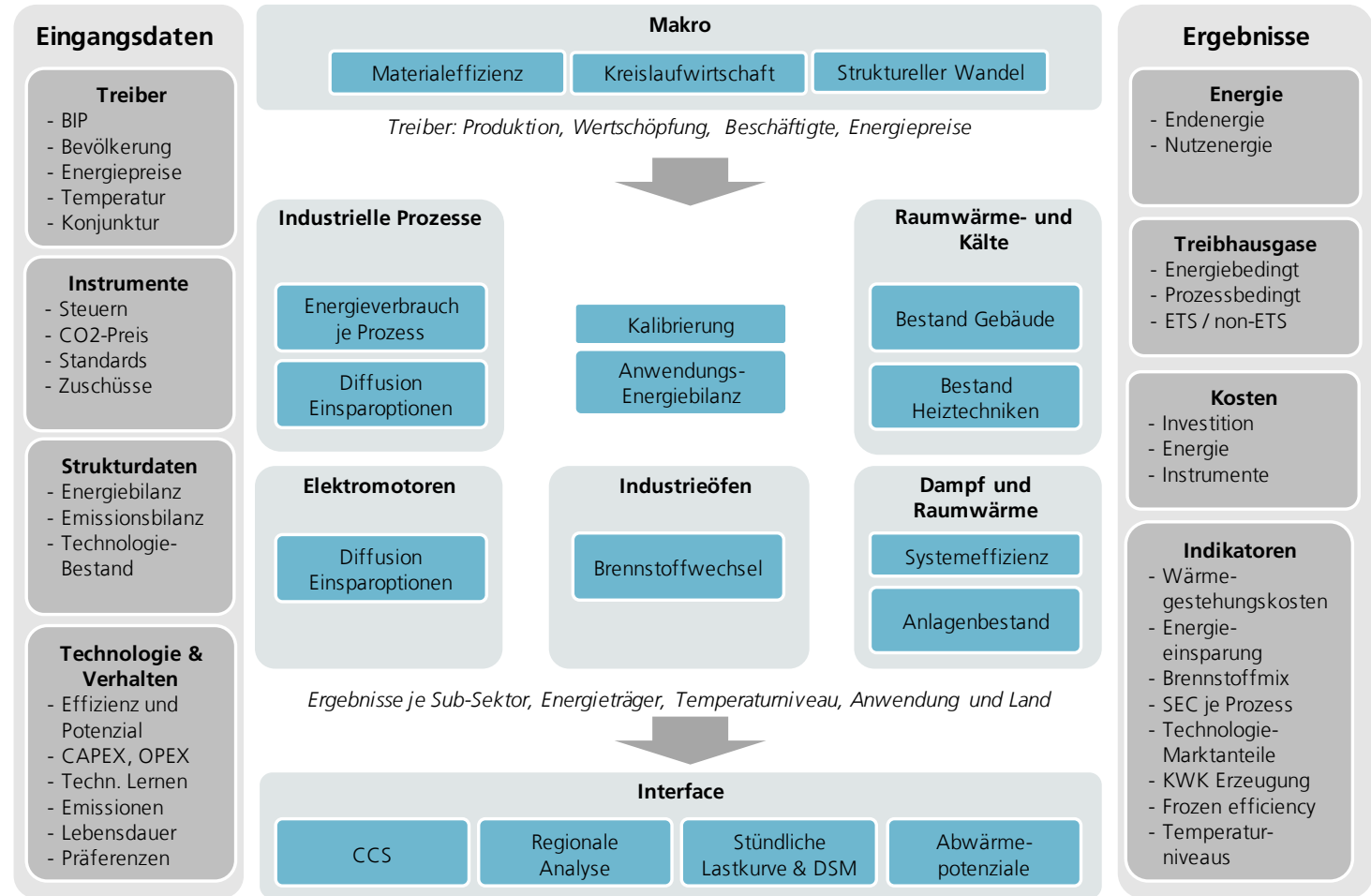


# Methode I: Erstellung von Szenarien mit dem Simulationsmodell FORECAST

- 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

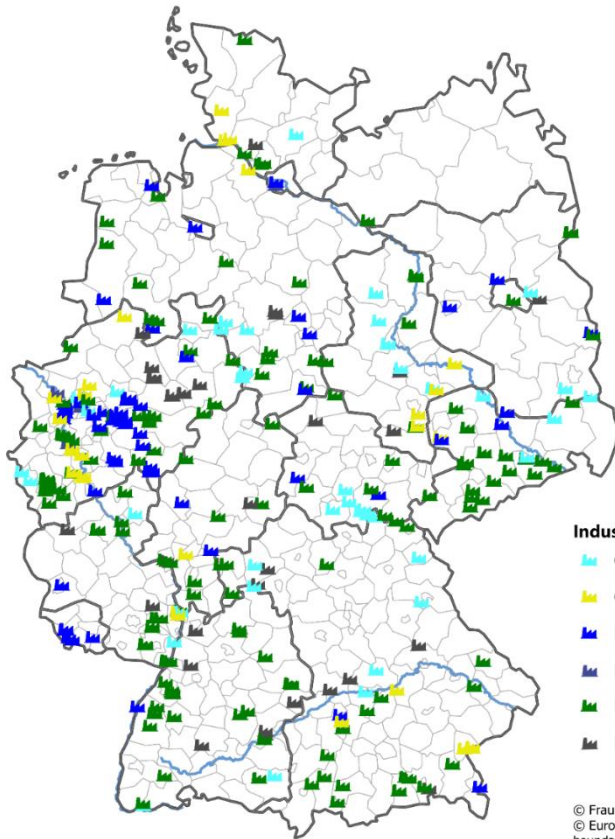
Energieintensive Industrie

Nicht energieintensive Industrie

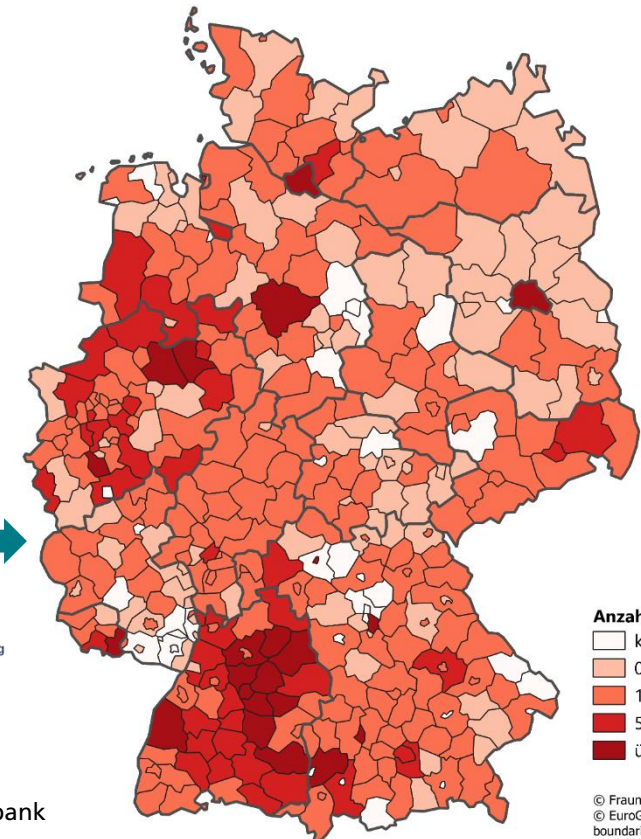
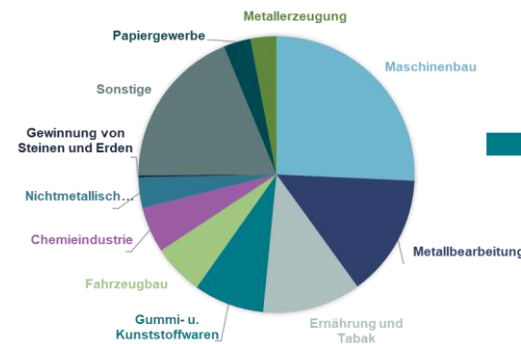
Verteilschlüssel

Produktionsmenge je Standort

Beschäftigte pro NUTS 3 Region



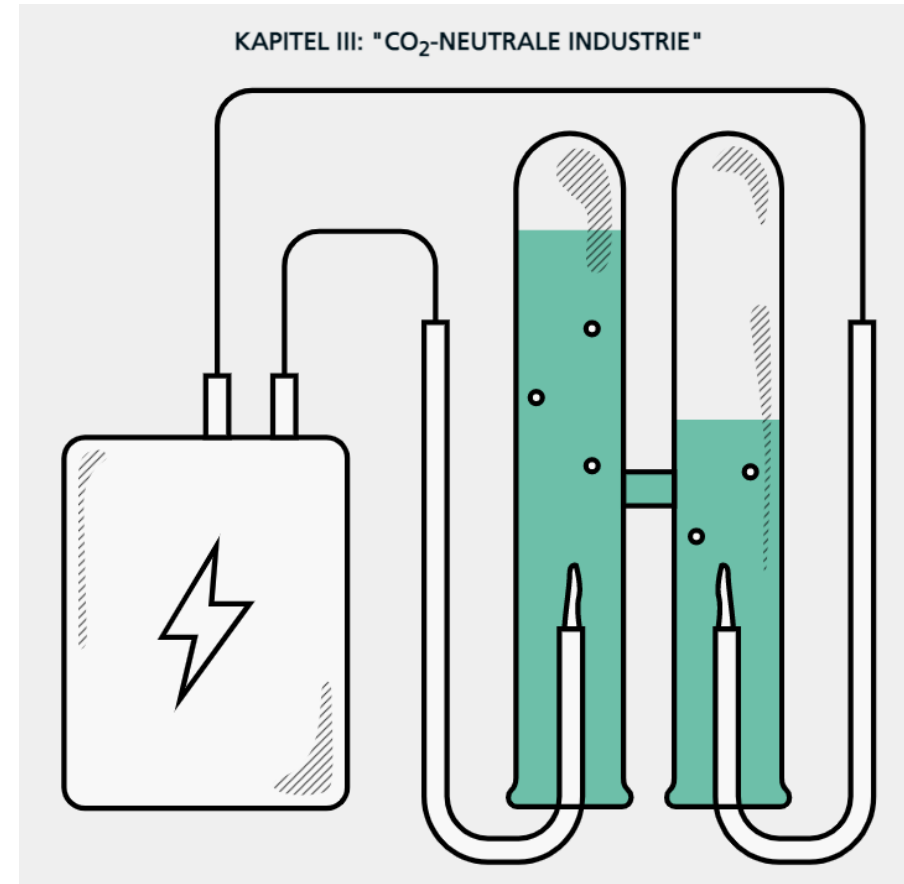
© Fraunhofer ISI  
© EuroGeographics for the administrative boundaries



© Fraunhofer ISI  
© EuroGeographics for the administrative boundaries

# Wasserstoff für die Versorgung einer CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-neutrale Stahlproduktion



- **Staus-Quo:** In DE etwa 30 Mio. Tonnen Primärstahlproduktion über die Hochofenroute mit hohem Kohlebedarf für die Reduktion des Eisenerzes
- **CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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**



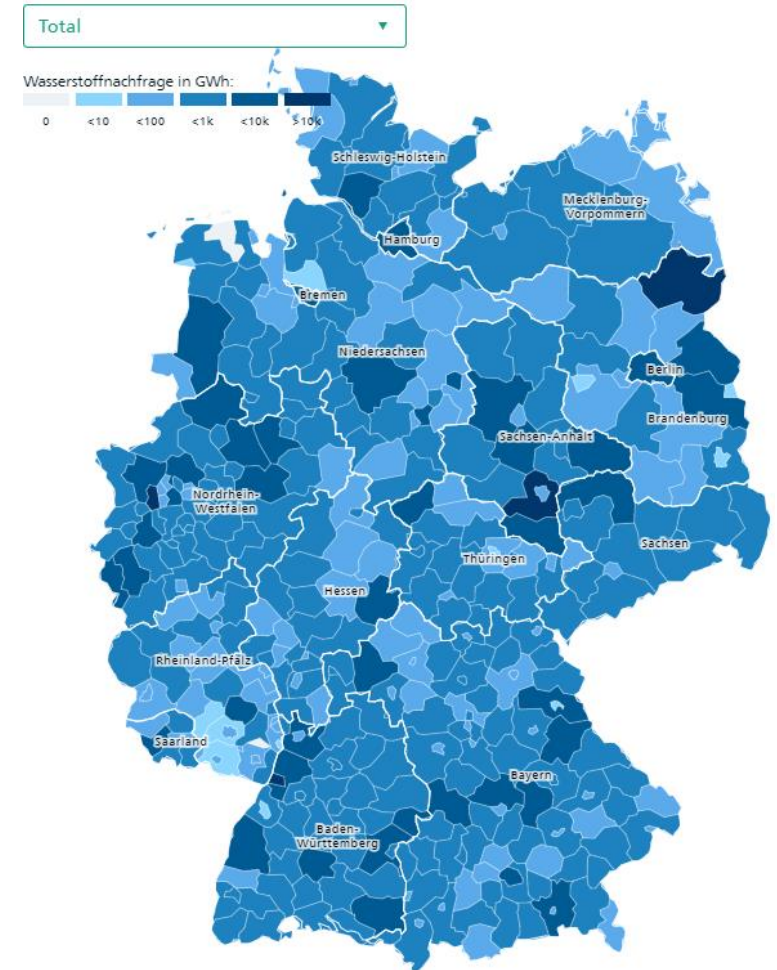
# Wasserstoff zur Bereitstellung von Prozesswärme in allen Branchen

## ■ Status-Quo

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

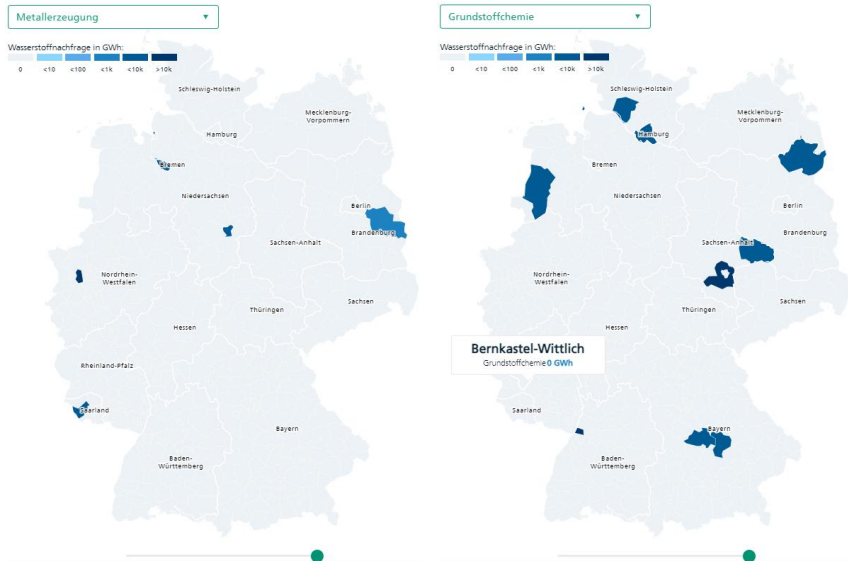
## ■ CO2-neutral

- 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

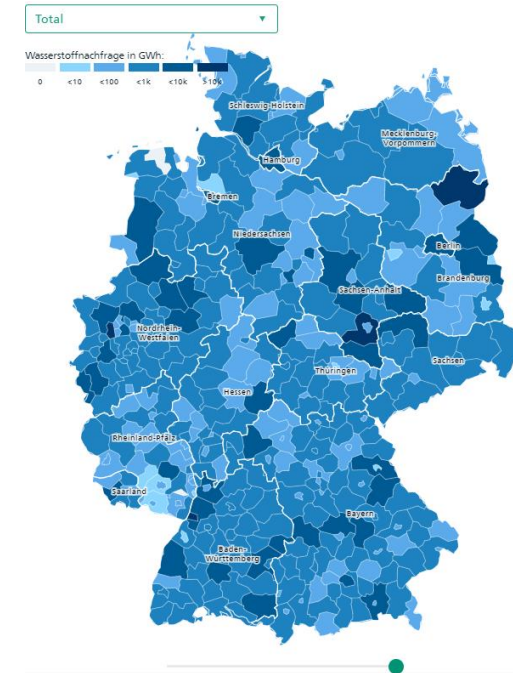


~150-250 TWh Wasserstoff

## Unterschiedliche Energiesysteme und Strategien

- › Verbindung der großen Verbrauchszentren möglich über H<sub>2</sub>-Transportnetz
- › Übergang auf breitere Nutzung erfordert Verteilnetz

Zusätzlich: H<sub>2</sub>-Anwendung für die Prozesswärme in allen Branchen



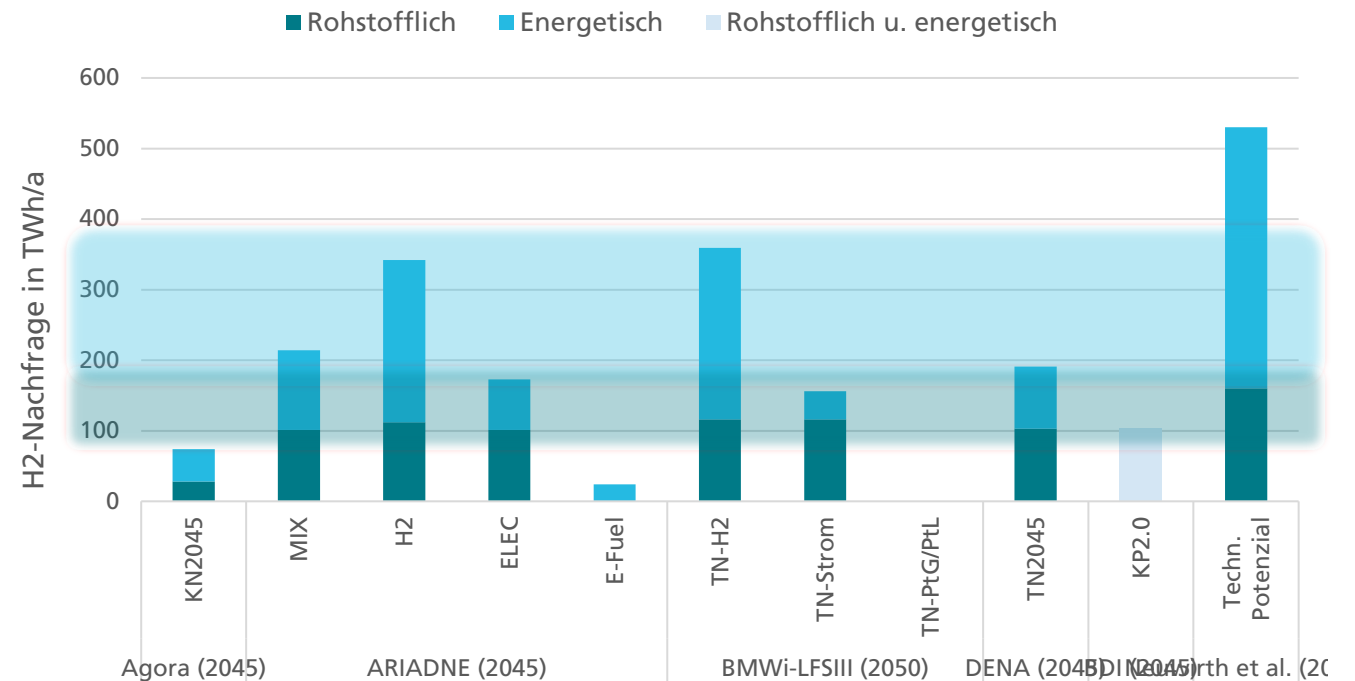
~250-500 TWh Wasserstoff

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 H<sub>2</sub>-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

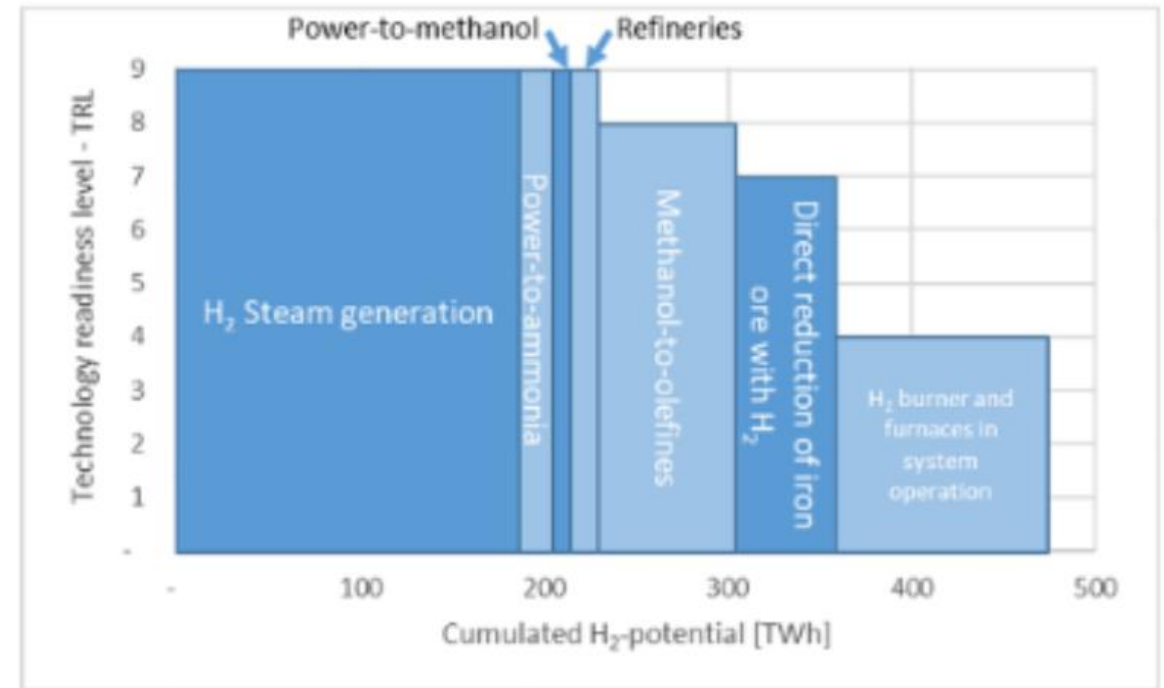


Fig. 7. Hydrogen potentials of the bottom-up and top-down analysis depending on the TRL. Instead of TRL ranges, the lower estimated TRL by technology is shown.

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

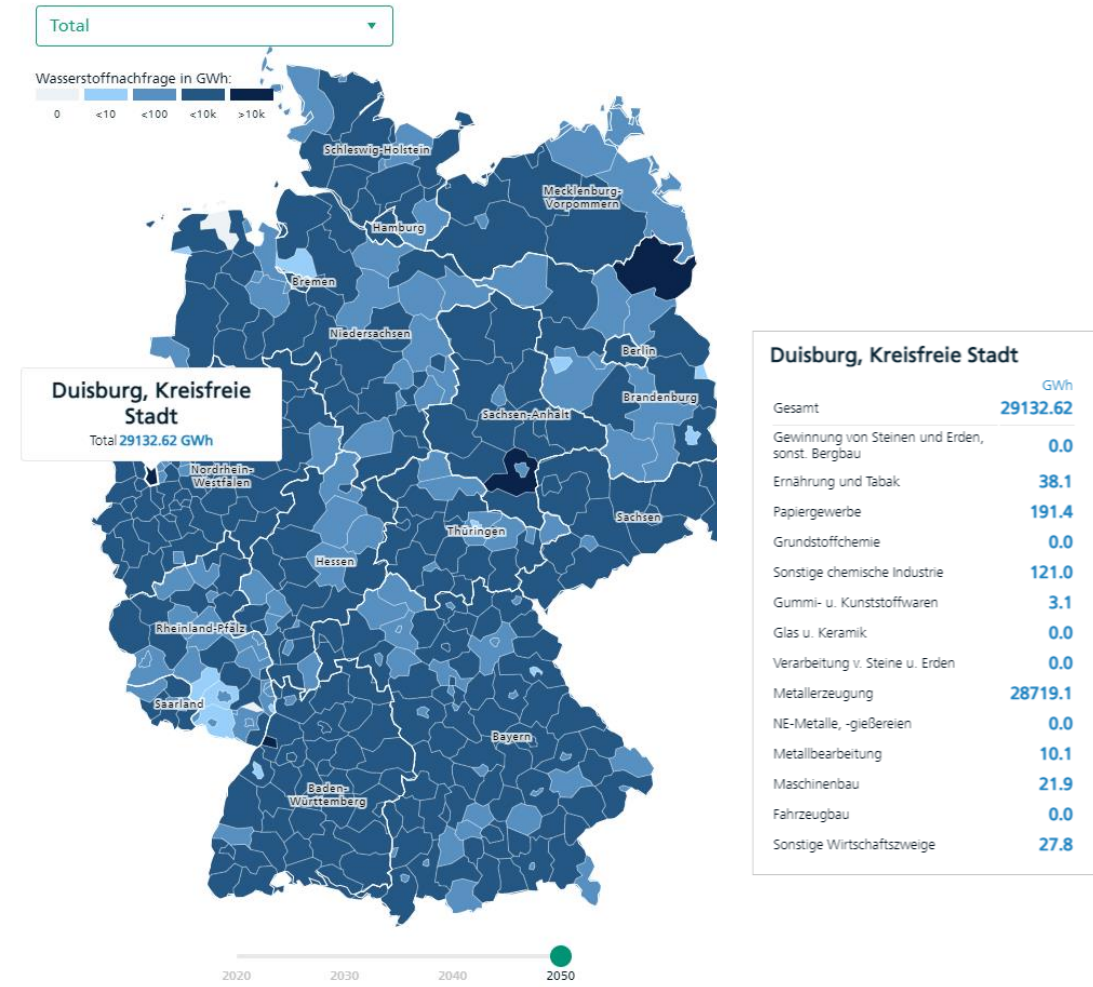
# Schlussfolgerungen

---

- › 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](mailto: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](#)

