

Wissenschaftliche Begleitstudie zur Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen

DETLEF STOLTEN, SIMONAS CERNIAUSKAS, PETER MARKEWITZ, JOCHEN LINßEN, FELIX
KULLMANN, THERESA GROß, PETER LOPION, PHILIPP HEUSER, THOMAS GRUBE, MARTIN ROBINIUS

Online Präsentation

08.06.2021

d.stolten@fz-juelich.de

IEK-3: Techno-Economic Systems Analysis

Rolle des Wasserstoffs in der Energieversorgung von NRW bis 2050

- Bedeutung von **NRW** in der Transformation des **deutschen Energiesystems**?
- Bedeutung der **Wasserstoff-Lieferketten** für **NRW – EU / weltweit**?



- Erzeugungspotenziale und **Lokalisierung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs in NRW**?
- Aufbauptide der **Wasserstoffinfrastruktur in NRW**?

Methoden und Modelle

IEK-3 Model-Suite: ETHOS

RESkit

H2MIND

InfH2

stündliche Auflösung

Europower

FINE. Building

FINE.NESTOR Einknoten

FINE. Infrastructure Mehrknoten

GFOpt

FINE. District

dgnetz

LPG

FINE. Transport

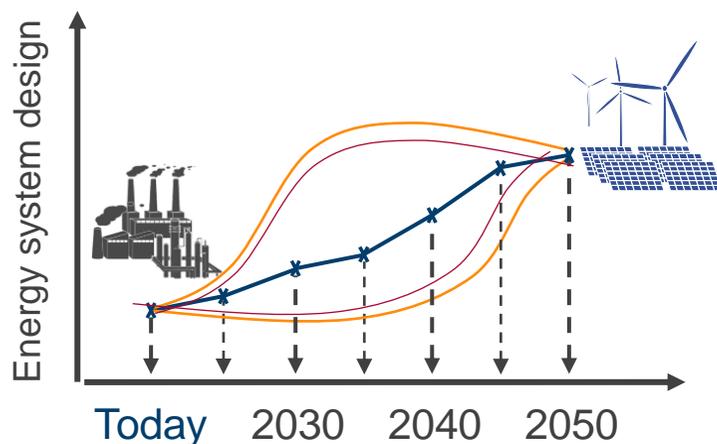
MO|DE

ETHOS:
Energy Transformation Pathway Optimization Suite

FINE.NESTOR*: Tool zur Minimierung der Gesamtkosten des Energiesystems

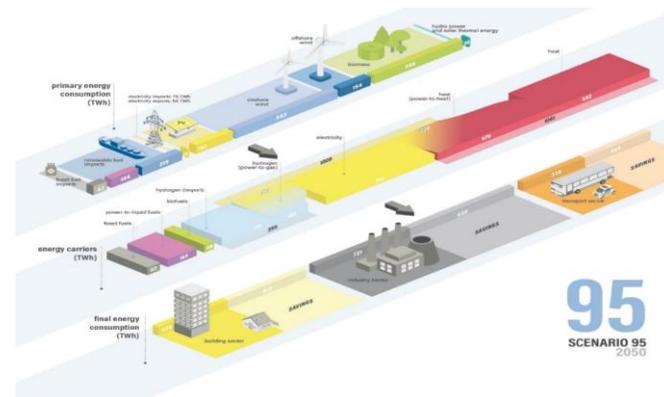
Merkmale

- Integrierte Energiesystemmodell
- Abdeckung aller Energiesektoren durch
 - 1300 Techniken
 - 2000 Verknüpfungen
- Ziel: Gesamtkostenminimierung
- Realistisch durch
 - GIS geographische Informationssysteme
 - Begrenzung von Auf-, Ausbauraten
 - Kosten-, Nachfrageentwicklung berücksichtigt
- Zeitliche Auflösung: 1 h
- Räumliche Pseudo-Auflösung (9 Regionen)



Fähigkeiten

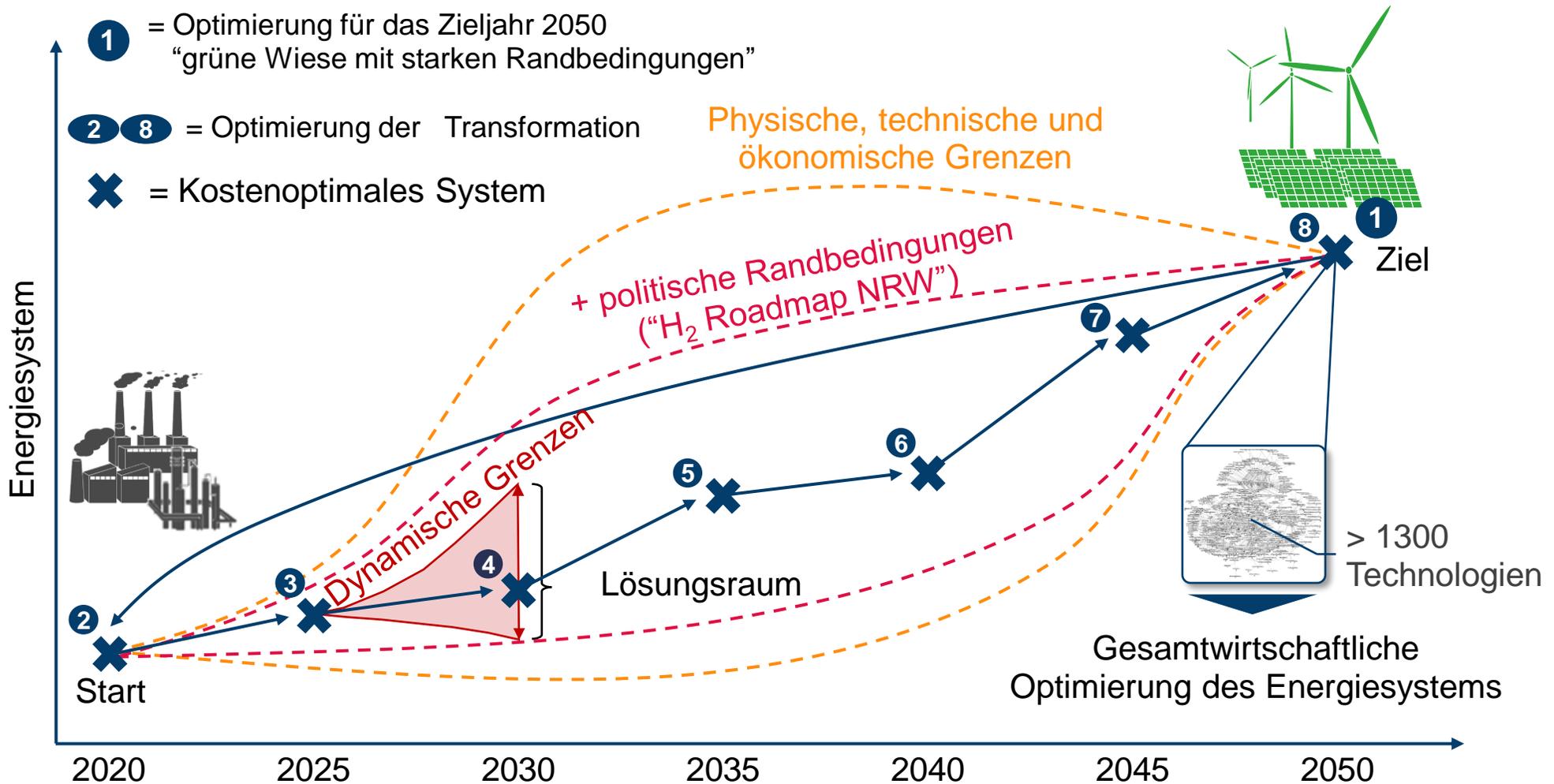
- Minimierung der jährlichen Gesamtkosten unter Berücksichtigung technischer und ökologischer Randbedingungen
- Kostenoptimale nationale **Transformationsstrategien**
- Analyse von Sektorkopplungsoptionen
- Kopplung mit nationalen und internationalen Modellen zum Ausbau der **Energieinfrastruktur & Handel mit erneuerbaren Energieträgern**



* Framework for Integrated Energy System Assessment for a National Energy System Model with SecTOR Coupling

P. Lopion et al., Cost uncertainties in Energy System Optimization Models: A Quadratic Programming Approach for Avoiding Penny Switching Effects. Energies 2019, 12, 4006

Kostenoptimierte Transformation des Energiesystems in 5-Jahresschritten

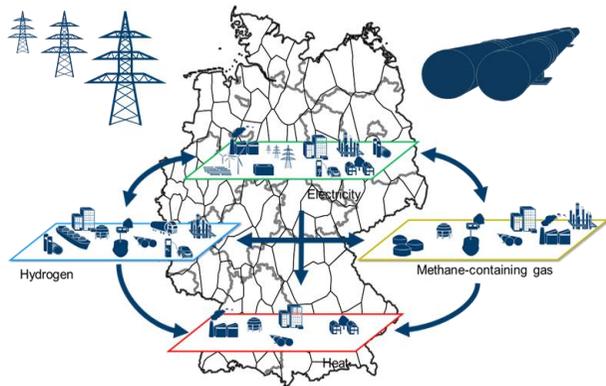


[1] Lopion, P., et al., *Cost Uncertainties in Energy System Optimization Models: A Quadratic Programming Approach for Avoiding Penny Switching Effects*. Energies, 2019.

FINE.Infrastructure: Tool zur regionalen Auflösung

Merkmale

- **Räumlich aufgelöste Modellierung des nationalen Energiesystems**
- Auslegung von Komponenten und Transportnetzen inklusive Betriebsoptimierung für Deutschland
- Skalierbare räumliche Auflösung (bis zu 475 Regionen, \triangleq Landkreise; i.d.R. 80 Regionen)
- Gesamtoptimierung von Infrastrukturen und Sektorkopplungstechniken



Fähigkeiten

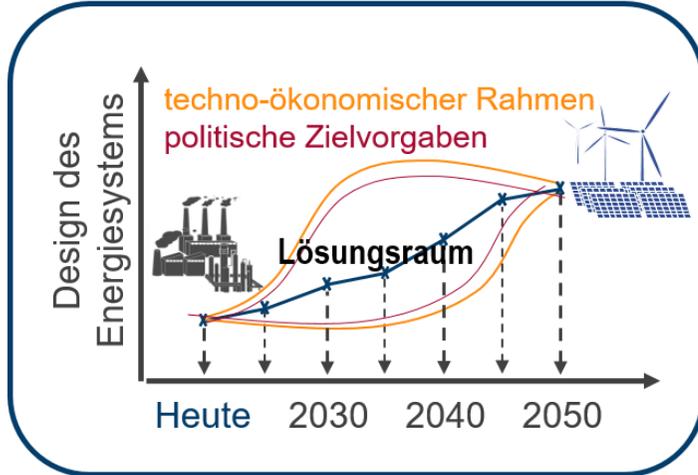
- Minimierung der jährlichen Gesamtkosten unter Berücksichtigung technischer, regulatorischer Randbedingungen und CO₂ Minderungszielen
- Detaillierte Abbildung mit regionaler und stündlicher Auflösung je Energieträger inklusive deren Kopplung
- Berücksichtigung des Energieaustausch zwischen Regionen und Import/ Export
- Integrierte Netzplanung für Szenarien



Optimization Model for Spatially Resolved Energy Infrastructure

Ergebnisse: - Transformationspfade des Energiesystems, - integrierte Netzaulegung für Strom, Erdgas und Wasserstoff

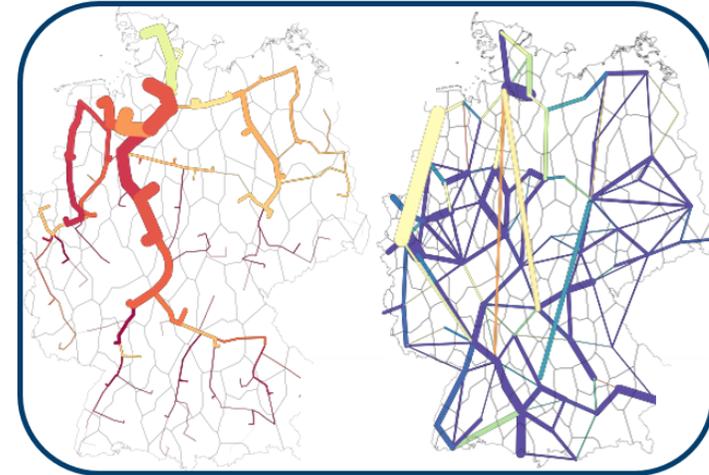
Optimierung Energiesystem



Von 1 zu 80
Regionen

Schwerpunkt auf
Strom/NG/H2

Räumliche Optimierung

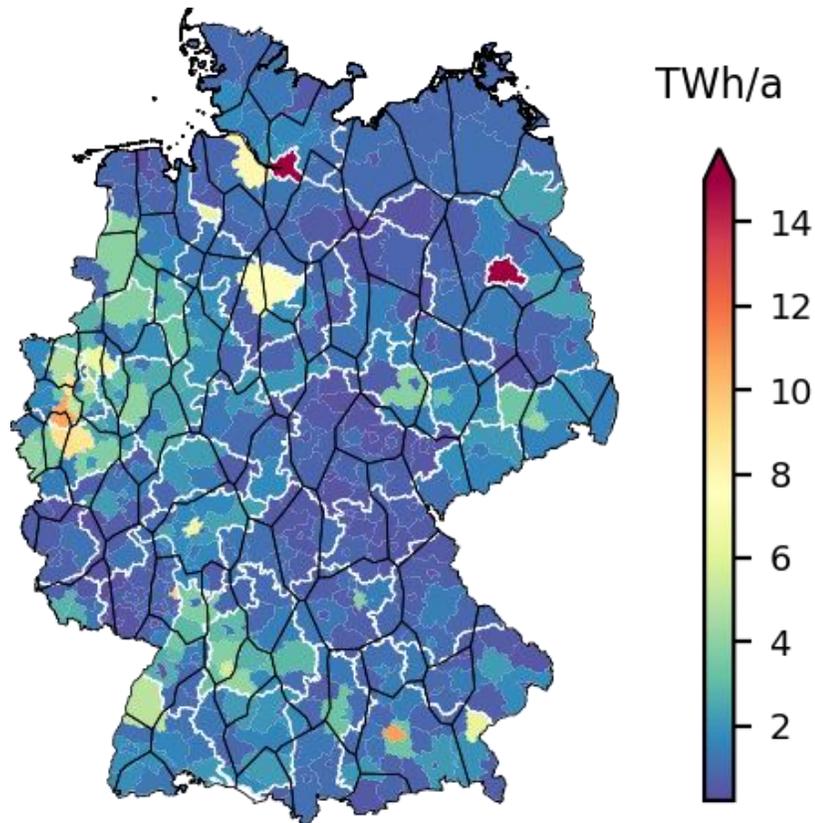


- **Integrierter Ansatz:** alle Systeminteraktionen und relevanten sozio-technische Rahmenbedingungen werden berücksichtigt
- Generische techno-ökonomische Daten als Grundlage
- Detaillierte techno-ökonomische **Analyse unter Unsicherheiten**
- **Reproduzierbare und konsistente Ergebnisse**

NG: Natural Gas

Energiesystem-adäquate regionale Auflösung zur integrierten Netzplanung

Regionalisierte Stromnachfrage 2050



- Räumliche Auflösung basiert auf den **Voronoi-Regionen** um die Höchstspannungsknoten des Stromnetzes → **hohe räumliche Auflösung in Regionen mit hoher Nachfrage nach Strom und Gas** (Ballungs- und Industriezentren); z.B. in NRW und Baden-Württemberg
- Abbildung Deutschlands mit 80 Regionen: **Trade-Off zwischen modelliertem Detailgrad und Rechenaufwand** aufgrund der Modellkomplexität (Berücksichtigung Strom/ Gas/ Wasserstoff)

Abb.: Vergleich zwischen Regierungsbezirken (in weiß eingezeichnet) und den verwendeten 80 Regionen (in schwarz eingezeichnet).

Methodik: Regionalisierung der Endenergienachfragen

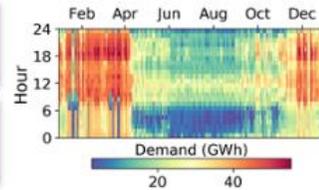
Endenergiebedarf im Szenario

Haushalte

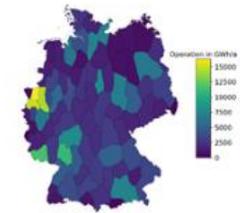
GHD

Industrie

Transport



Input für räumliche Optimierung



Regionalisierung nach

Verteilschlüssel

- Bevölkerung
- Einkommen
- Wohnfläche
- Beschäftigte nach Branchen
- Branchenspezifische Nachfragen
- Fahrzeugbestände
- Logistikfläche
- etc.

Verteilung der Endenergienachfrage

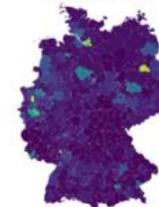
- Regionalisierung variiert für jeden Sektor und Endenergieträger
- Nachfrage des Umwandlungsbereiches nicht berücksichtigt sondern räumliche Optimierung

Regionalisierung

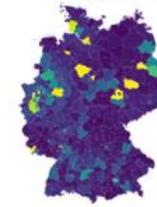
Electricity Demand 2050



Natural Gas Demand 2050

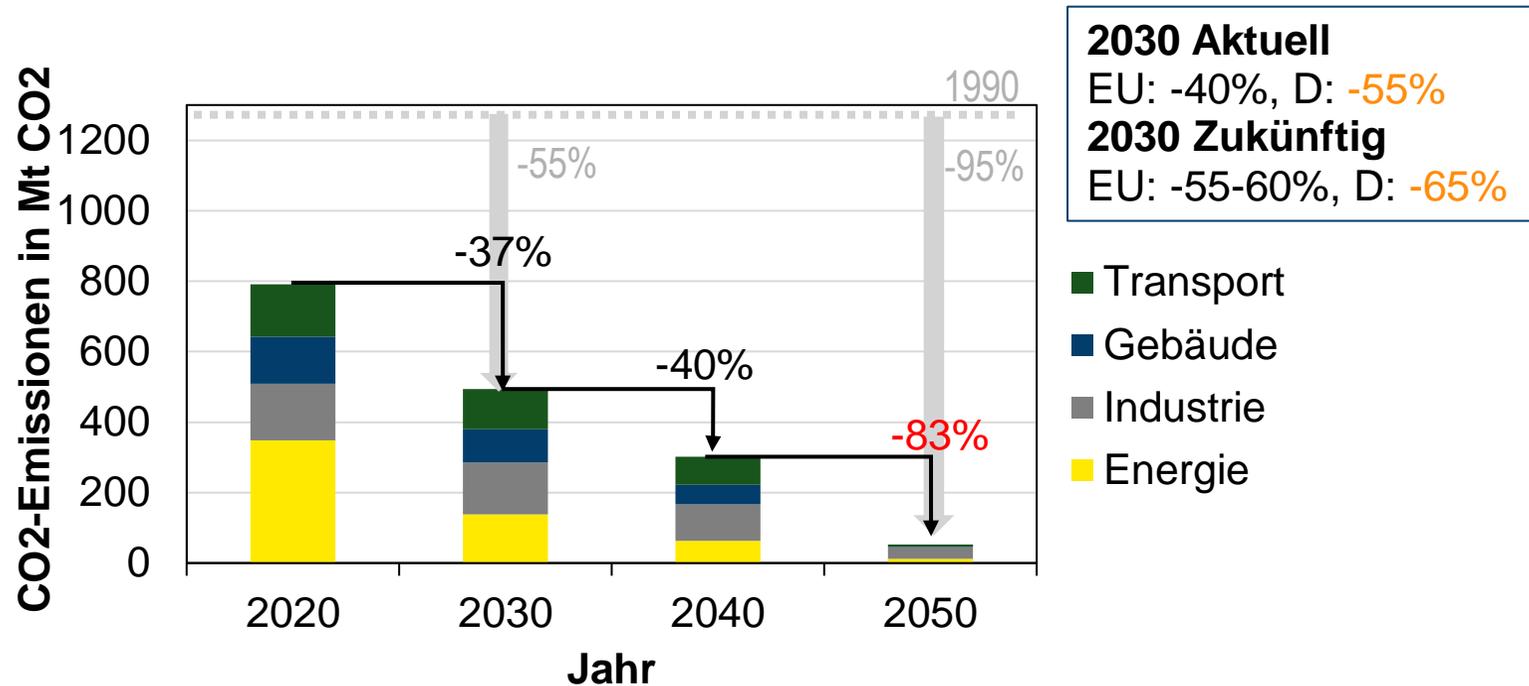


Hydrogen Demand 2050



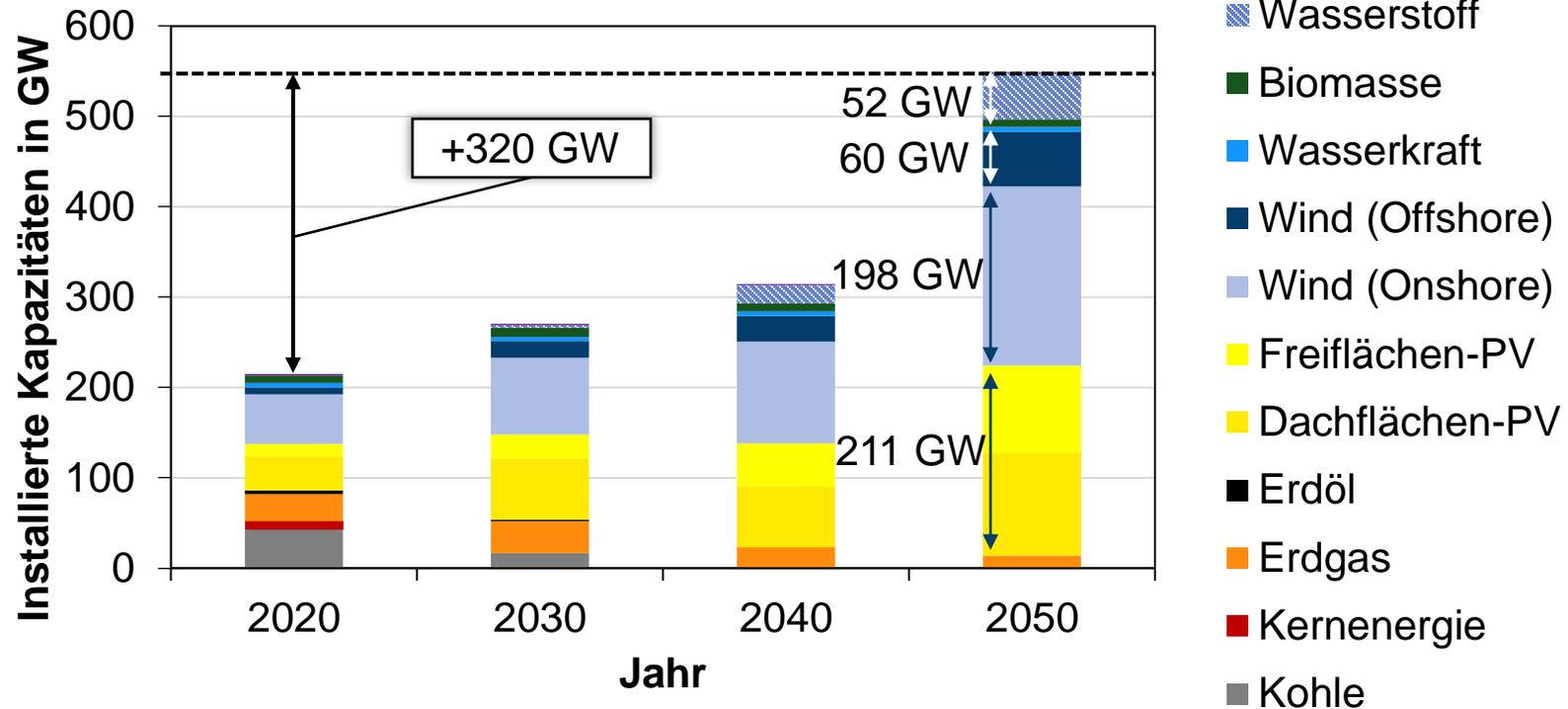
Ausgewählte Ergebnisse für Deutschland

Treibhausgasneutralität nur mit höheren Reduktionszielen



- Eine große Dynamik zwischen 2040 und 2050 erforderlich, die zu starken **Zäsuren und Brüchen** in vielen Bereichen wie **Gebäude, Industrie** und **Energiesektor** führt
- Die geplante Novellierung des Klimaschutzgesetzes mit **ambitionierten Zielen für die Zwischenjahre** hilft bei der Vermeidung dieser Brüche
- **Klimaneutralität der Produktionsprozesse** muss der Klimaneutralität des Energiesystems folgen

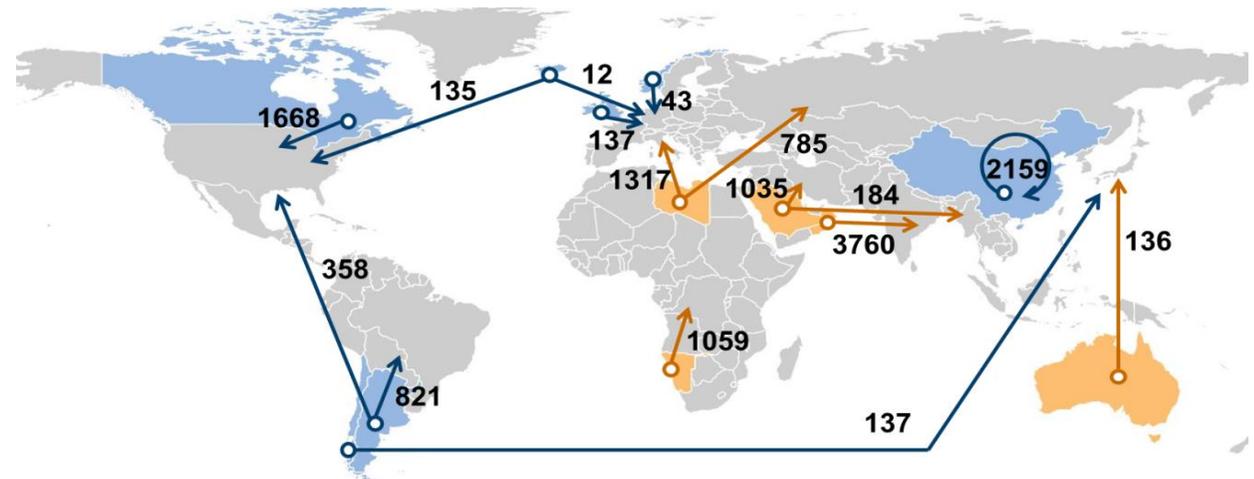
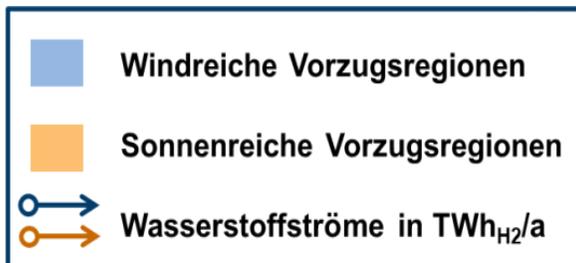
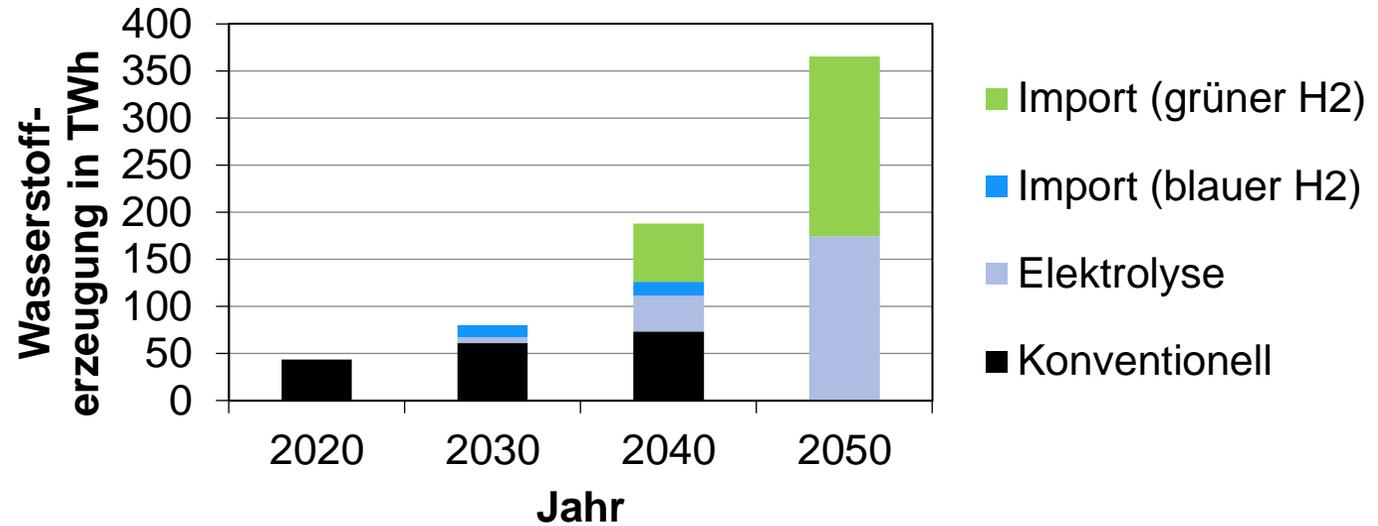
Treibhausgasneutralität nur mit höheren Reduktionszielen und ambitionierten Ausbauraten für erneuerbare Energie



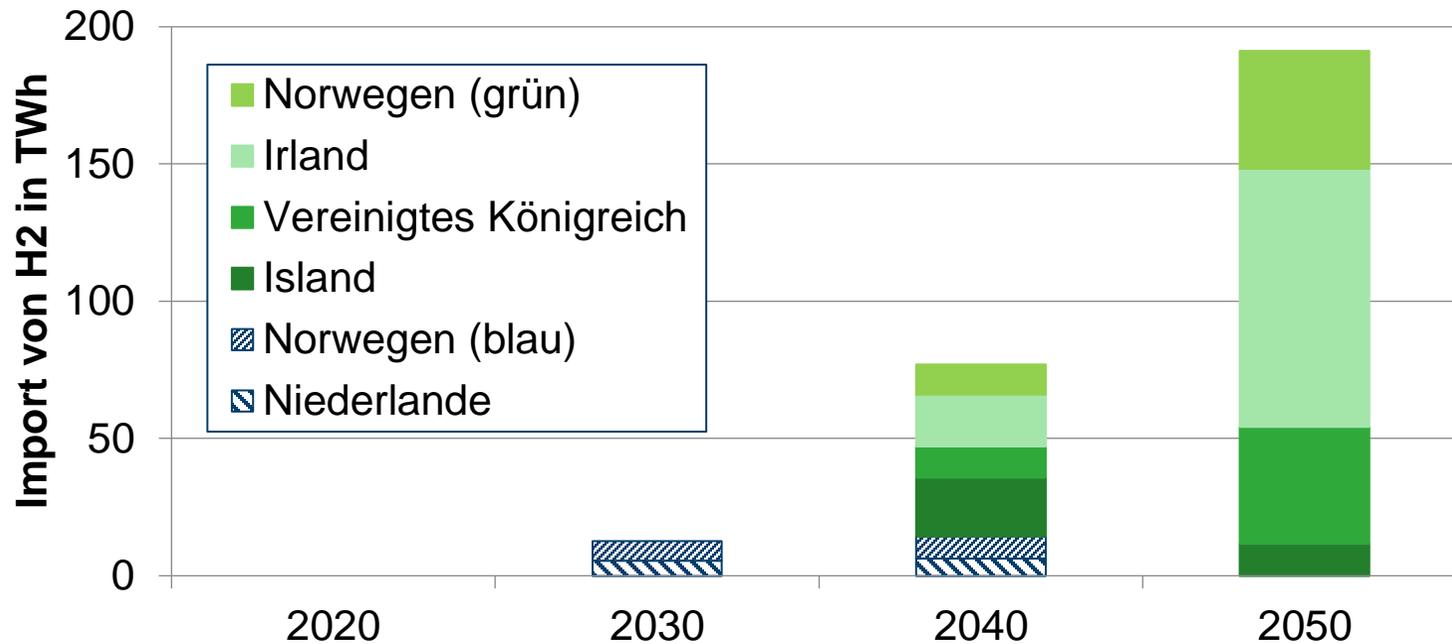
- Die installierte **Gesamtkapazität** steigt von etwa 230 GW heute auf **549 GW im Jahr 2050** an
- Ausbau von **Wind und PV** (469 GW) bis zum Jahr 2050 um mehr als **Faktor 4** gegenüber heute
- Durchschnittlicher Netto-Zubau: **4,8 GW/a** Wind (Onshore) und **5,3 GW/a** PV (Frei- und Dachfläche)

Import als Ergänzung zur inländischen Wasserstoffherzeugung

- **Import von blauem Wasserstoff** zum Markthochlauf wird zukünftig durch grünen Wasserstoff abgelöst
- Wasserstoffbereitstellung – ein **hälftiger Mix** aus inländischer Produktion und Importen
- Die durchschnittlichen Importkosten betragen im Jahr 2050 ca. **3,85 €/kg_{H2}**

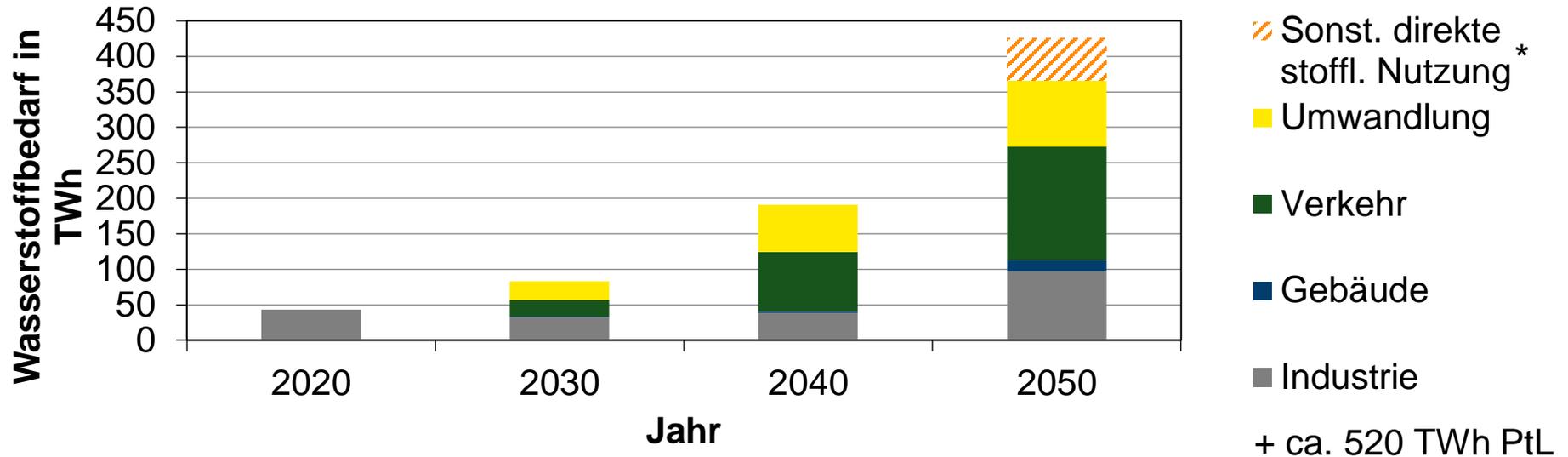


Zeitliche Entwicklung der Wasserstoffimporte



- **Im Jahr 2030 Import nur von blauem Wasserstoff** aus Niederlande und Norwegen
- Bereits zwischen 2030 und 2040 verliert blauer Wasserstoff an seiner Bedeutung
- **Import von grünem Wasserstoff aus Nord- bzw. Nordwest Europa:** Norwegen, Irland, Vereinigtes Königreich und Island

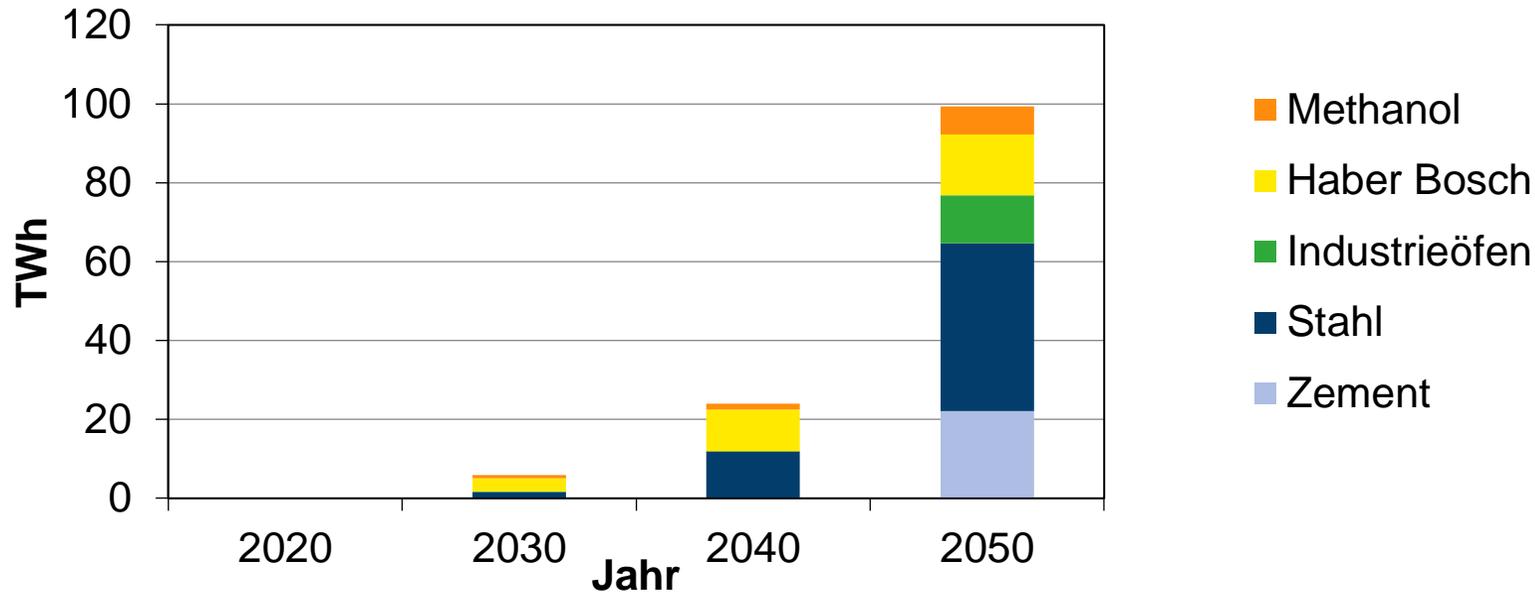
Breite Wasserstoffnutzung im Verkehr und Industrie bis 2050



- Wasserstoffeinsatz im Verkehr: Brennstoffzellenantriebe für **Pkw**, **Lkw** sowie **Züge** und **Busse**
- Ein großes Anwendungsspektrum für Wasserstoffeinsatz in der Industrie: **chemische Industrie** (Methanol und Ammoniak), **Stahl- und Zementindustrie** sowie **Industrieöfen**
- Einsatz von **hybriden Wärmepumpen** im Gebäudebereich
- Herstellung von **Synthesegas** und **Rückverstromung** im Umwandlungssektor

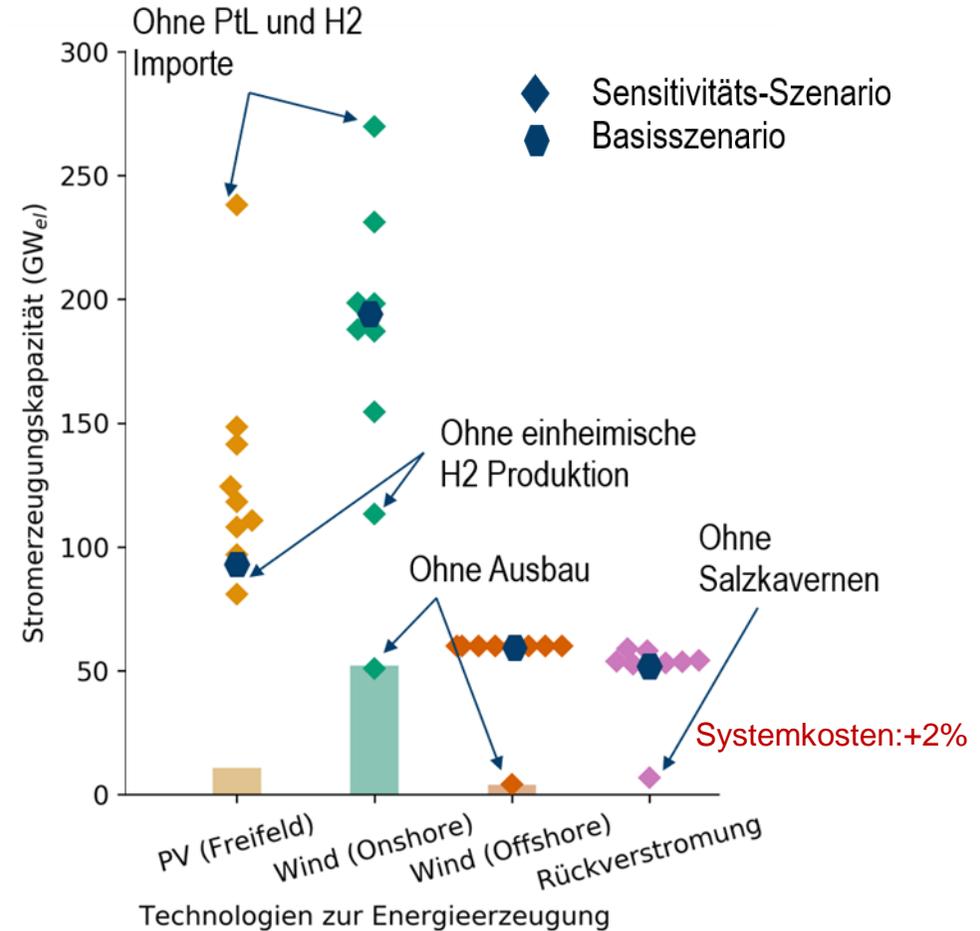
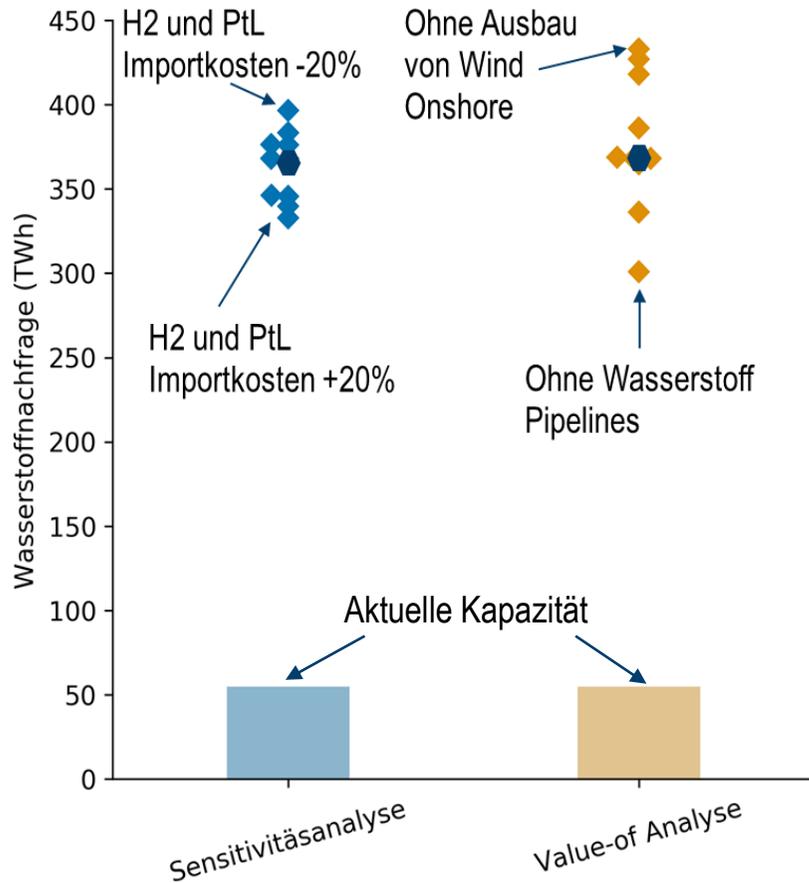
* Sensitivitätsanalyse für das Jahr 2050

Externer Wasserstoffbezug der Industrie



- **Frühzeitige Umstellung auf emissionsarme Ammoniaksynthese** (Haber Bosch)
- Zunehmende Wasserstoffnachfrage für **Stahlherstellung bereits zwischen 2030 und 2040**
- **Verzögertes Wachstum** Wasserstoffnachfrage für **Prozesswärmebereitstellung** (Zement und Industrieöfen)

Wasserstoff und Erneuerbare als No-Regret-Maßnahmen



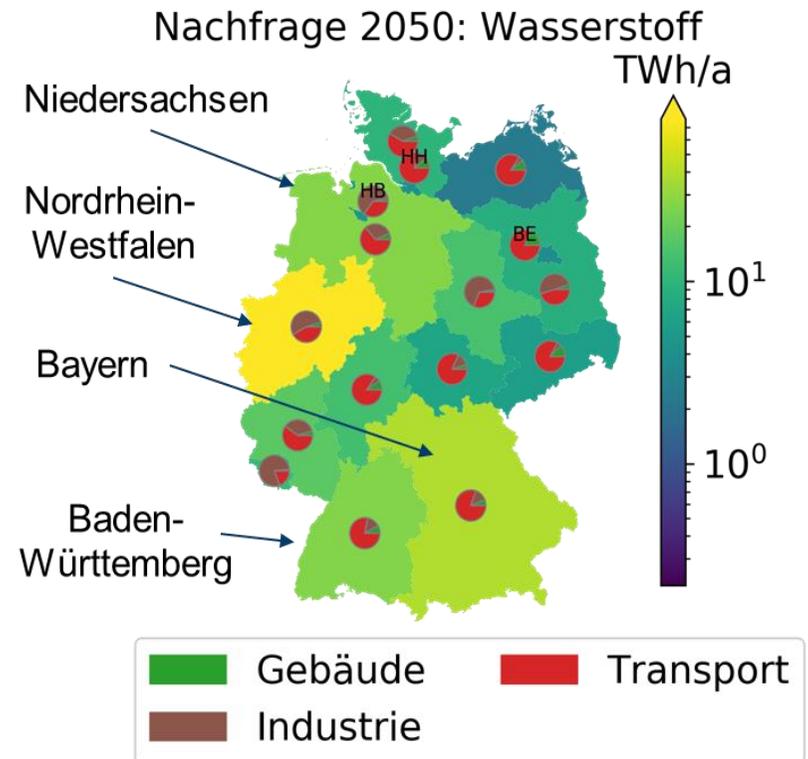
EE: Erneuerbare Energie; Ergebnisse für das Jahr 2050; Sensitivitäten und Value-Of Analysen

Ausgewählte Ergebnisse für Nordrhein-Westfalen

NRW ist zentral für das deutsche Energiesystems im Jahr 2050

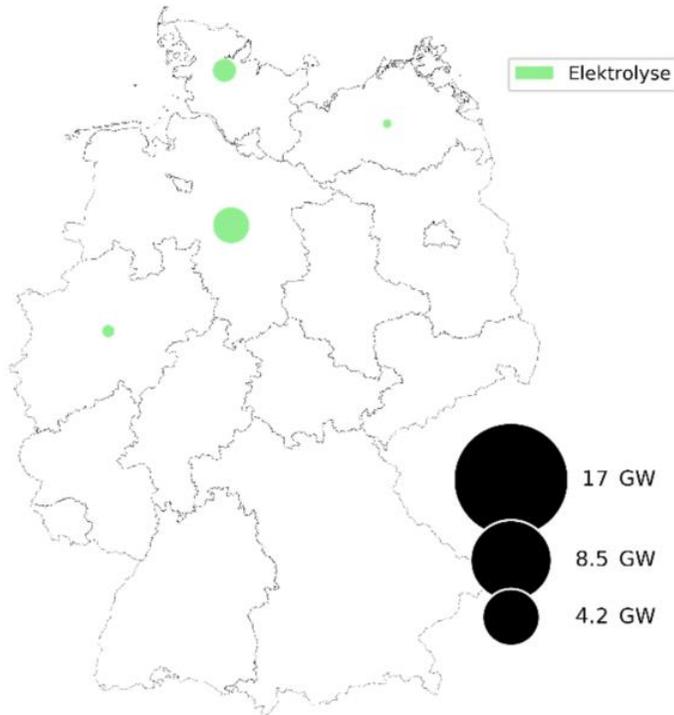
- NRW beinhalten **alle Elemente der Wasserstoff Infrastruktur**: Import, Elektrolyse, Speicher, Pipelines und Rückverstromung

	NRW	Deutschland
Bevölkerung	22 %	83 Mio.
Wasserstoff Import	68 %	22 GW _{LHV}
H2 Bedarf Industrie	43 %	160 TWh
Salzkavernen	29 %	84 TWh
H2 Bedarf Verkehr	21 %	94 TWh
Strombedarf	21 %	761 TWh
Rückverstromung	20 %	51,5 GW
PV und Wind	11 %	469 GW
Elektrolyse	9,5 %	70 GW

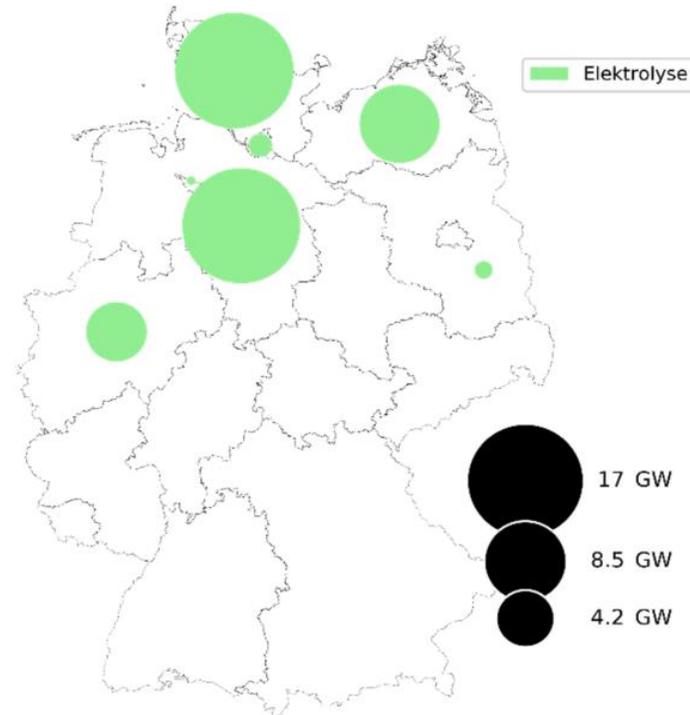


Teile der Elektrolysekapazitäten in NRW installiert

Installierte Elektrolyse Kapazität **2030**
nach Bundesländern



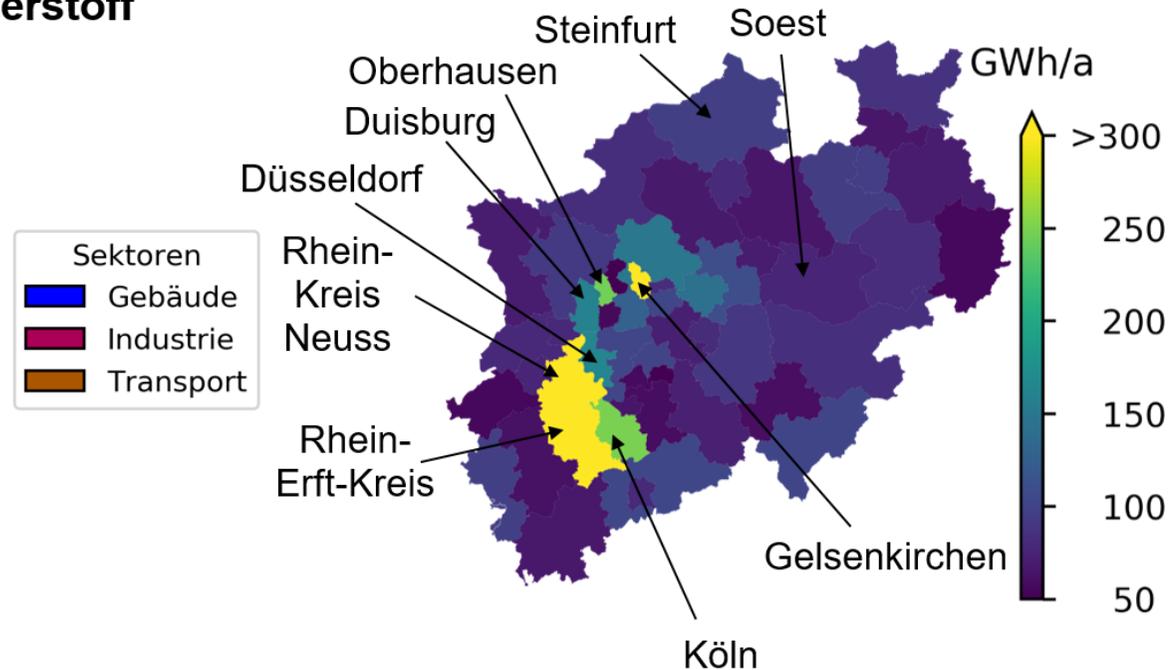
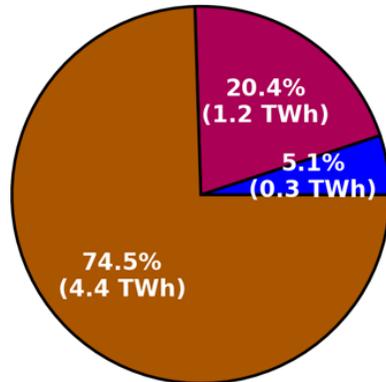
Installierte Elektrolyse Kapazität **2050**
nach Bundesländern



- Wesentliche **Übereinstimmung** der **Elektrolyse-Standorte** mit den Regionen hoher **Wind-Onshore und Offshore-Erzeugung**
- **NRW** mit einem **Anteil von 9,5 %** an der **gesamten Elektrolyse-Kapazität** in Deutschland von knapp 70 GW im Jahr 2050

NRW als die Wasserstoffnachfrage-Region im Markthochlauf

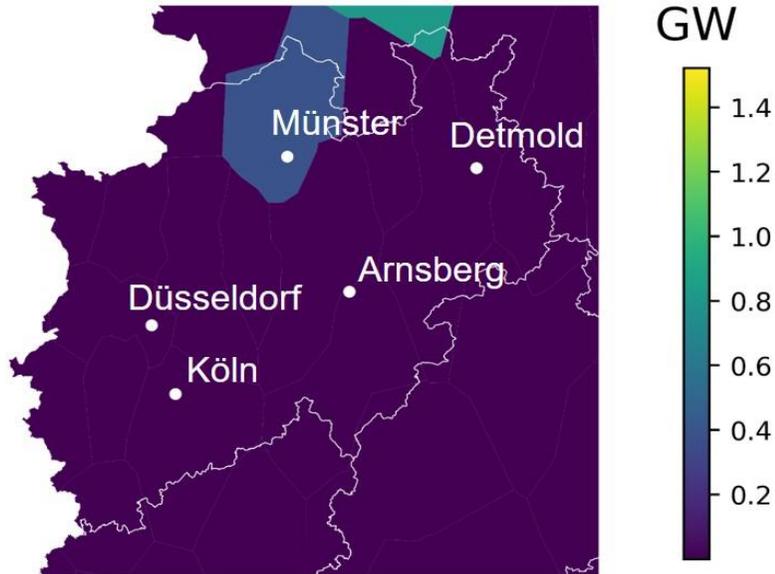
Nachfrage 2030: Wasserstoff



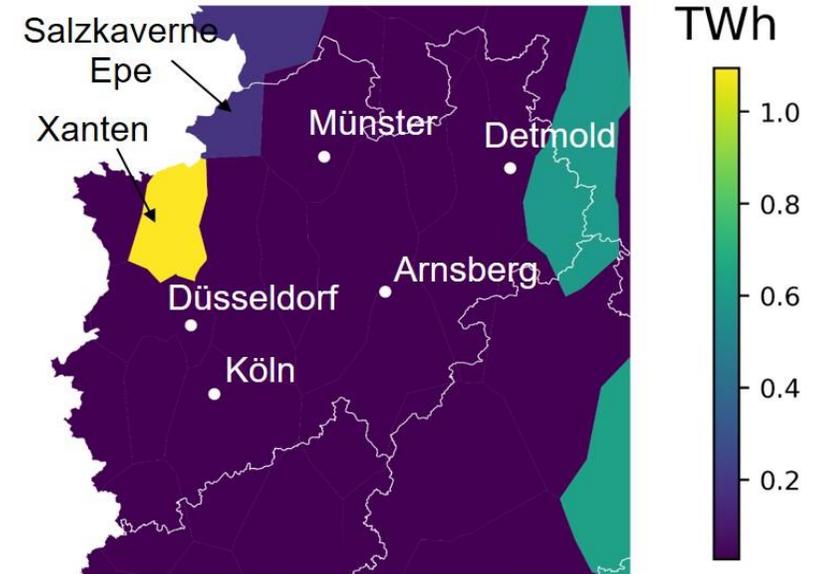
- **Wasserstoffnachfrage** im **Verkehr** (4,4 TWh) konzentriert auf Regionen mit **hoher Bevölkerungsdichte und große Fahrzeugbestände** in der Region Rhein-Ruhr
- NRW-Anteile der H₂-Nachfrage im Verkehr: Pkw 59%, Lkw 25%, Busse und Züge 16%
- **Wasserstoffnachfrage** in der **Industrie**: Rhein-Erft-Kreis, Rhein-Kreis Neuss und Gelsenkirchen mit Konzentration auf **Chemie/ Petrochemie**

Elektrolyse und Salzkavernen in NRW bereits im Jahr 2030

Elektrolyse-Kapazität, 2030

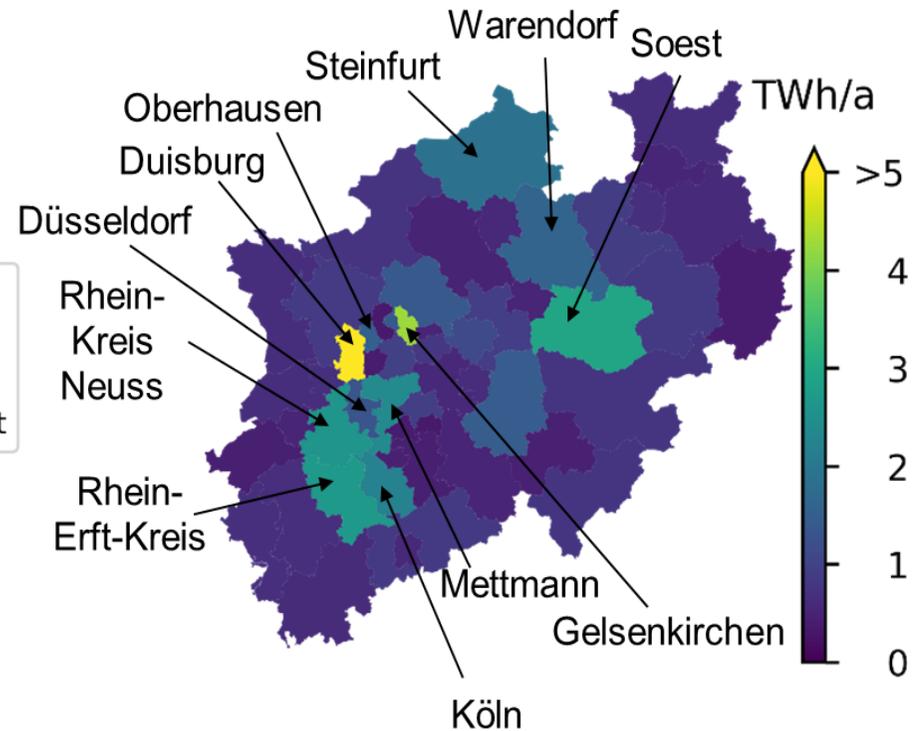
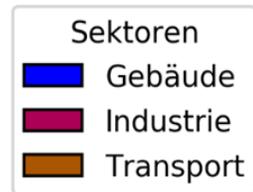
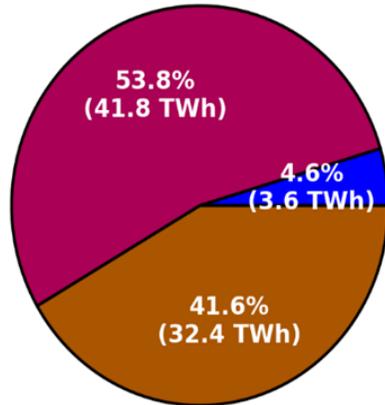


Salzkavernen Speicherkapazität, 2030



- Im Norden von **NRW etwa 200 MW** von insgesamt 4 GW installierter Elektrolyse-Leistung
- Deckung von knapp **5 % der Wasserstoffnachfrage in NRW** -> Versorgung aus andern Bundesländern und Import
- Umstellung Salzkavernen in NRW: **1 TWh Speicherkapazität in umgestellter Salzkaverne** in Kombination mit Rückverstromung zur Lastdeckung

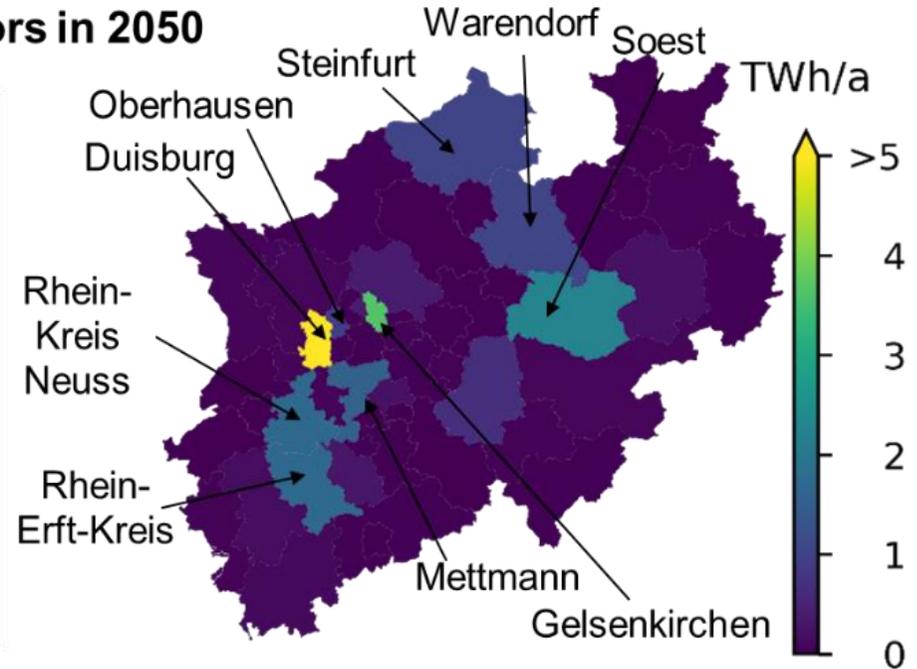
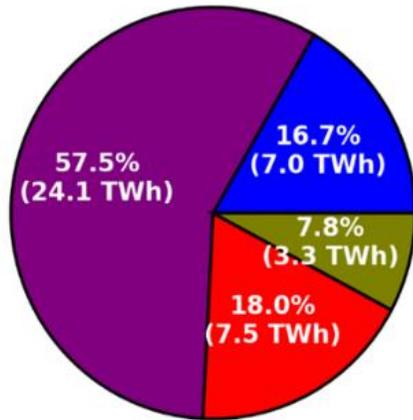
NRW als Hotspot der Wasserstoffnachfrage im Jahr 2050



- Wasserstoffnachfrage in der Industrie: Rhein-Ruhr (**Stahl und Chemie**) sowie Zentrum und Norden von NRW (**Zementindustrie**)
- Wasserstoffnachfrage im Verkehr: Bevölkerungszentren in der Region Rhein-Ruhr (**Pkw, Lkw, Busse und Züge**)

H₂-Nachfrage der Stahlindustrie entscheidend für NRW, Jahr 2050

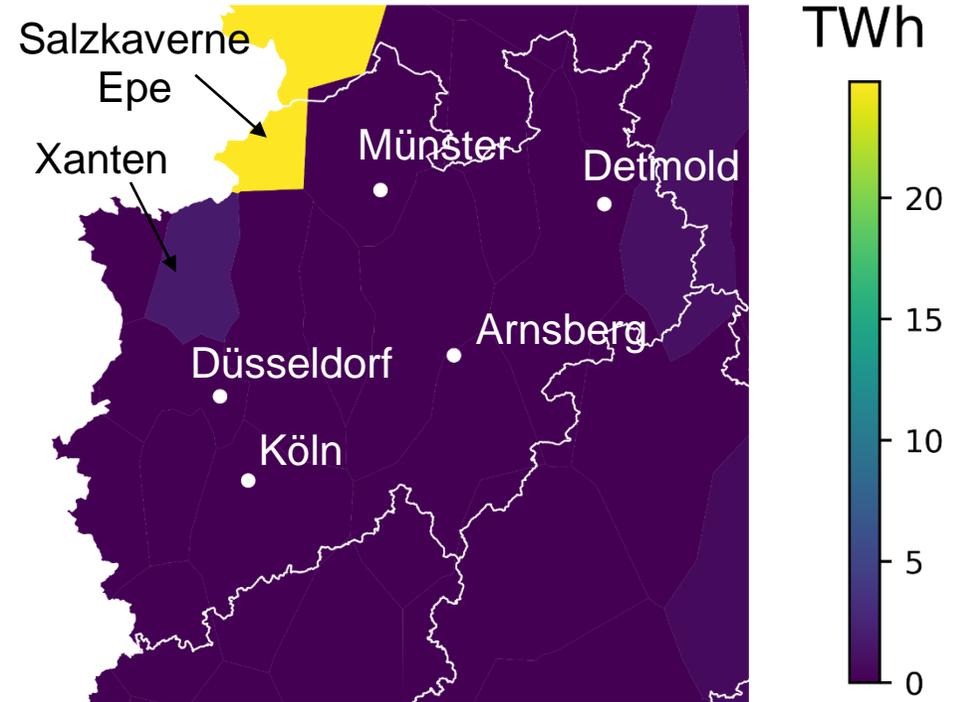
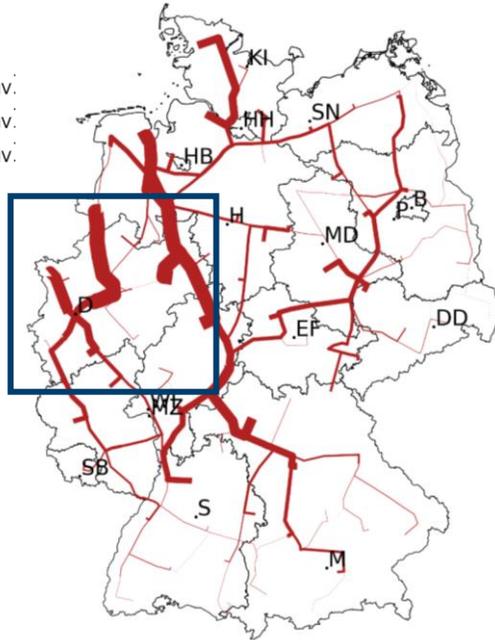
Wasserstoffnachfrage des Industriesektors in 2050



- **Wasserstoffnachfrage Industrie: 42 TWh** (extern, nicht am Standort produziert)
- **Nachfragezentren: Stahl, Chemie, Zement**

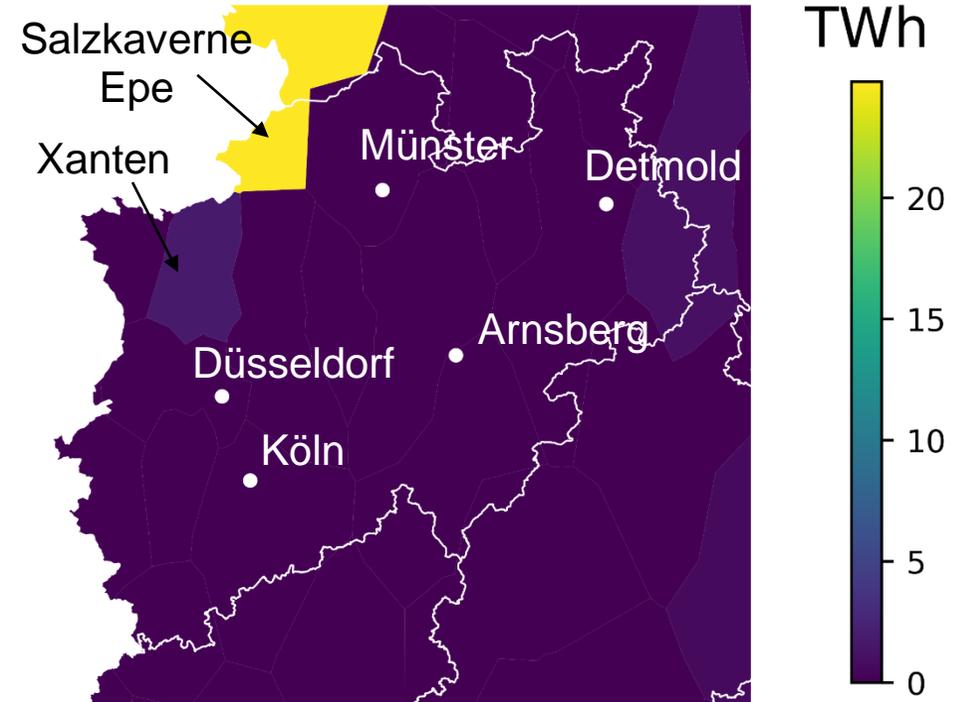
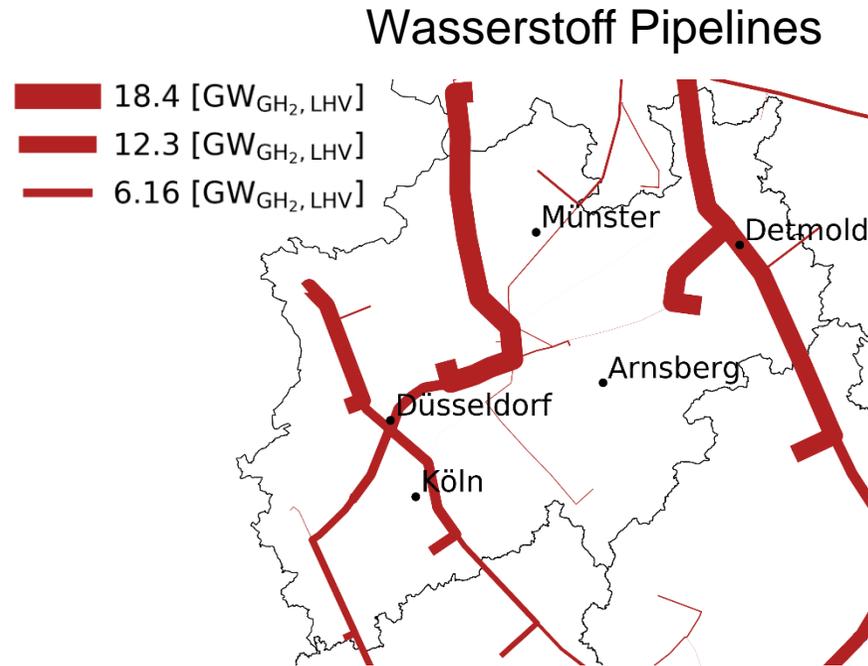
NRW als zentrale Drehscheibe für eine nationale H₂-Versorgung

Wasserstoff Pipelines



- **NRW als Drehkreuz des Pipelinenetzes:** Neue und Umgestellte Pipelines nach Norden und der Niederlande sowie zu den Regionen in Südwestdeutschland
- Großskalige **Nutzung des bestehenden Salzkavernen in NRW** für saisonale Wasserstoffspeicherung

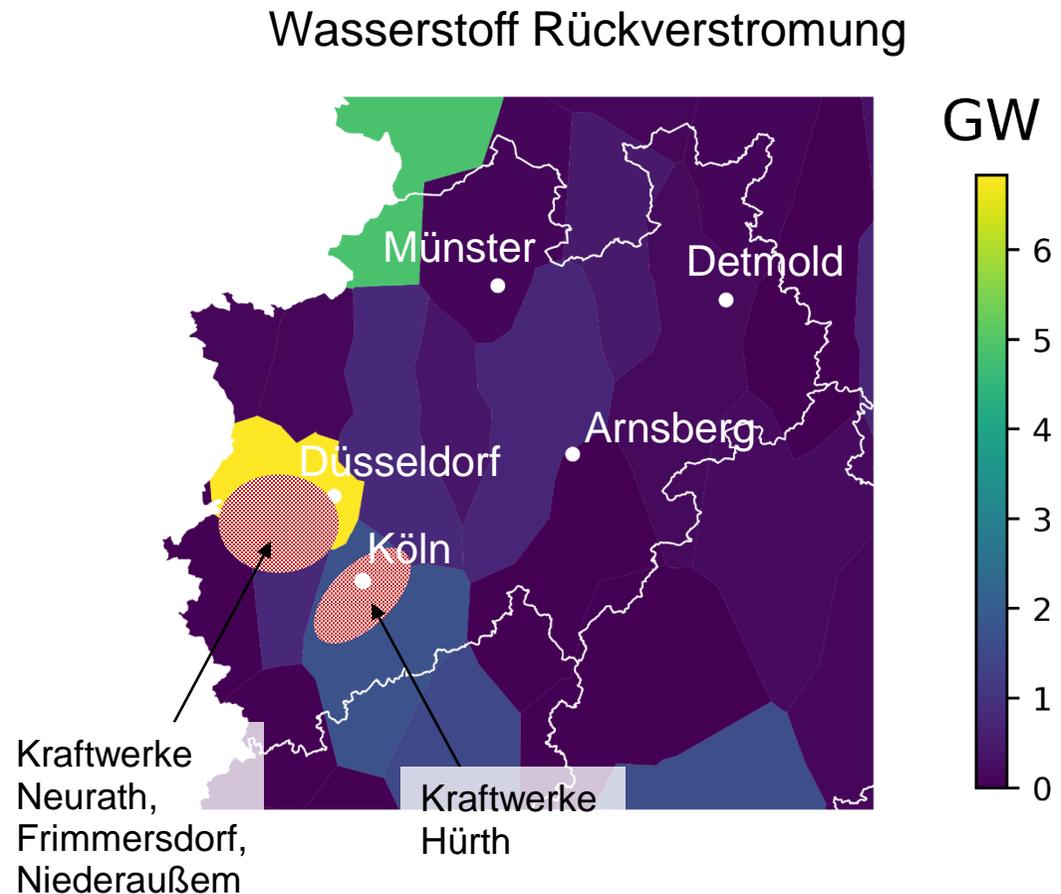
NRW als zentrale Drehscheibe für eine nationale H₂-Versorgung



- **NRW als Drehkreuz des Pipelinenetzes:** Neue und Umgestellte Pipelines nach Norden und der Niederlande sowie zu den Regionen in Südwestdeutschland
- **Großskalige Nutzung des bestehenden Salzkavernen in NRW** für saisonale Wasserstoffspeicherung

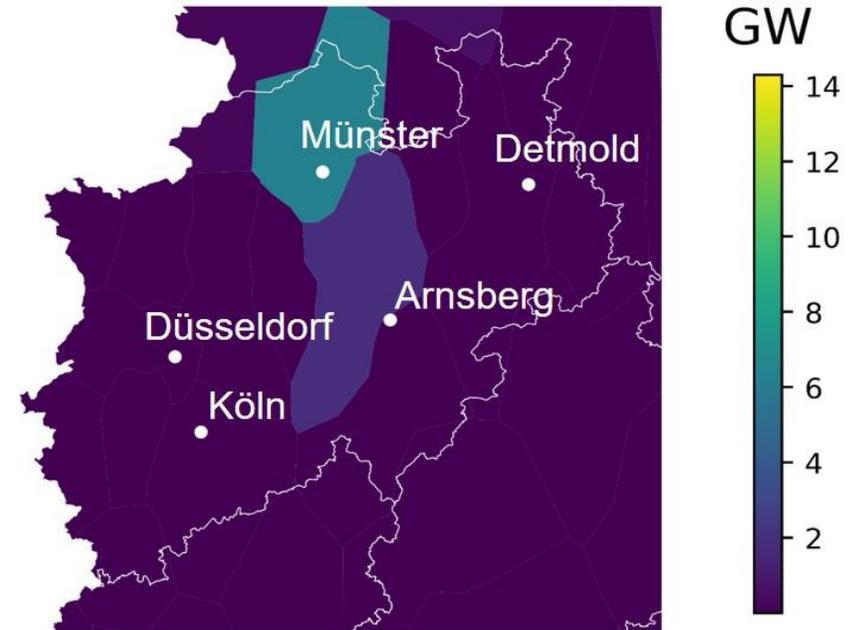
Bestehende Energieinfrastruktur zukunftsweisend nutzen

- Die Kapazität der **Wasserstoff-Rückverstromung in NRW über 10 GW** im Jahr 2050
- Wasserstoff- Rückverstromung wird vor allem verbrauchernah in der **Nähe von ehemaligen Kohlekraftwerksstandorten** platziert
- Entsprechend wird der Aufbau von Rückverstromungsanlagen und notwendigen Leitungen zusätzliche Investitionen in den von dem **Strukturwandel betroffenen Regionen fördern**



Nutzung der bestehenden Energieinfrastruktur für H₂-Versorgung in NRW

- **Berücksichtigung der Netzverknüpfungspunkte** von Offshore-Windparks an Standorte wegfallender Kohle-/ Kernkraftwerke
- Elektrolyse im **Norden (5 GW_{el})** und in der **Mitte (1,6 GW_{el})** von NRW
- Merkmale der Regionen mit Elektrolyse:
 - gleichzeitig **geringe bis mittlere Stromnachfragen**
 - **nicht-bedarfsgerechter Strom für eine verbrauchsnahe Wasserstoffproduktion**
- **Gesamtproduktion von ca. 18 TWh Wasserstoff** (weniger als 1/5 des Bedarfs in NRW)



Notwendigkeit der Versorgungsketten zu benachbarten Regionen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

