

# LANGFRISTSZENARIEN FÜR DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS IN DEUTSCHLAND

Orientierungsszenarien O45

Webinar der Orientierungsszenarien | 02. Juli 2024

Maximilian Evers, Berkan Kuzyaka, Prof. Dr. Joachim Müller-Kirchenbauer



Entwicklung der  
Gasnetzinfrastruktur  
in treibhausgasneutralen  
O45-Szenarien

→ O45-Strom  
→ O45-H2



Fraunhofer  
ISI

consentec



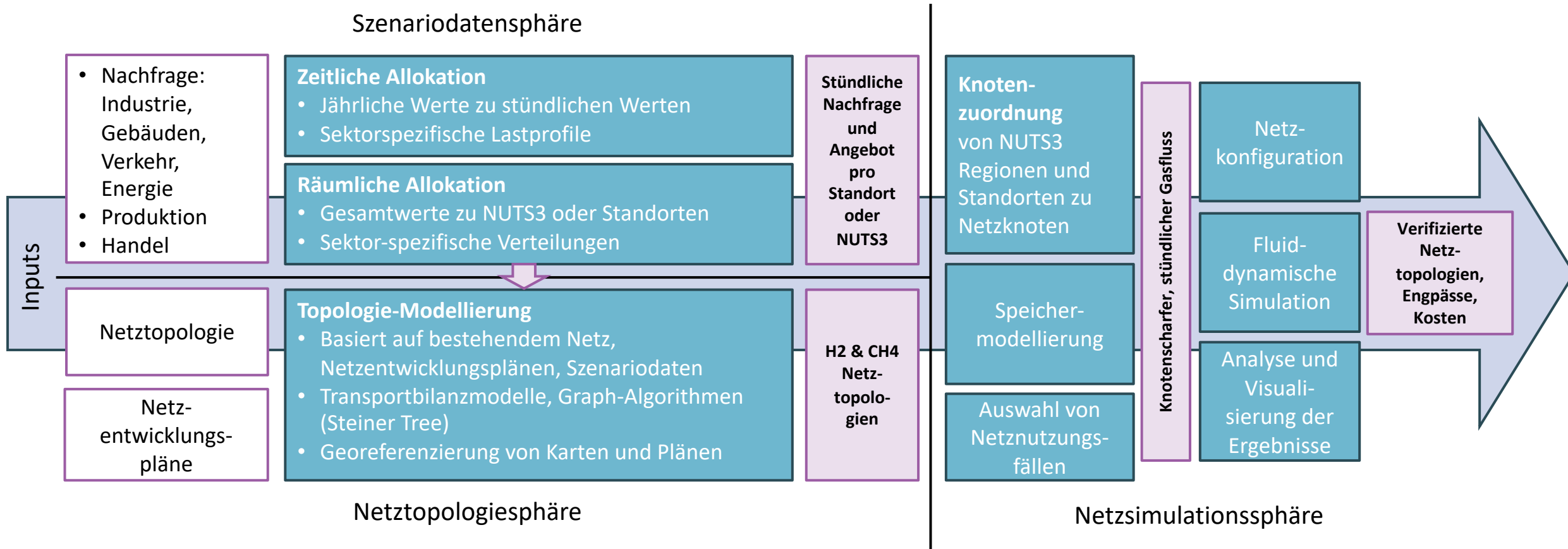
# Agenda

---

---

- **Überblick zu den Modellierungsansätzen und wichtigen Annahmen**
- Entwicklung der deutschen Gastransportnetzinfrastrukturen für Wasserstoff und Erdgas
- Strömungsmechanische Validierung der Gastransportnetzinfrastrukturen für Wasserstoff und Erdgas
- Einordnung des Infrastrukturbedarfs sowie der annuitätischen Gesamtkosten

# Leitungsscharfe Modellierung Transportnetze – Übersicht der Methodik



# Leitungsscharfe Modellierung Transportnetze – Für jedes Szenario zwei getrennte Gasnetz-Topologien

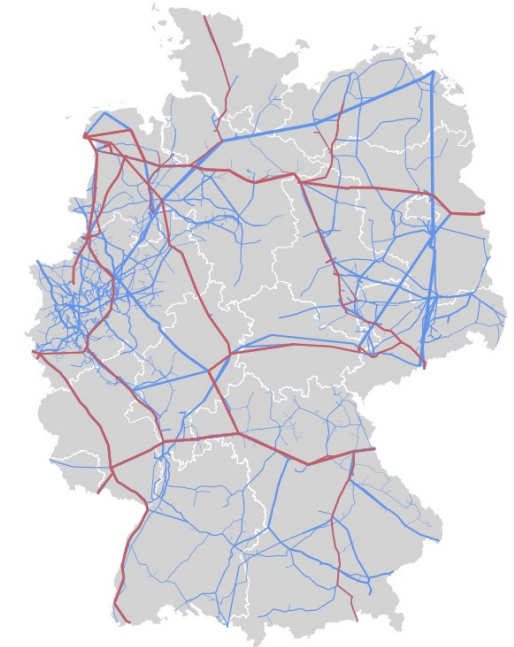
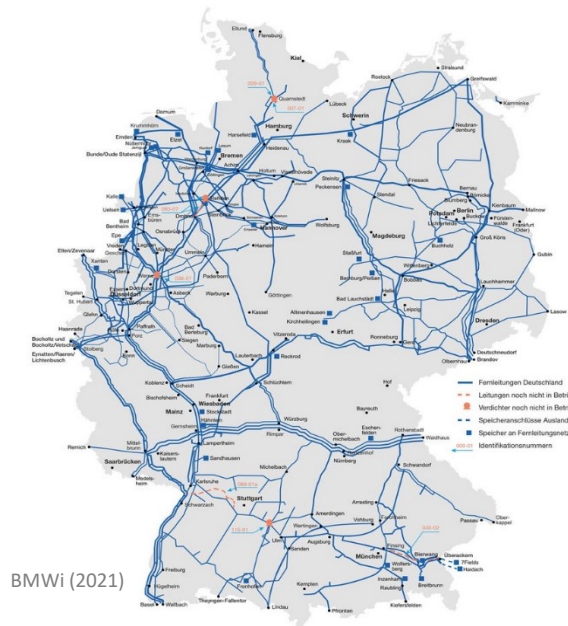
- Wasserstoffnetz wird vorrangig aus umgewidmeten Erdgas-Leitungen gebildet
  - Beachtung separater Transportaufgaben CH<sub>4</sub> und H<sub>2</sub> für die Gewährleistung der Transportaufgabe
  - Umfang des Wasserstoffnetzes vom konkreten Szenario abhängig

## Parallele Infrastruktur erkennen

- Nachfragestandorte (szenarioabhängig)
- (Fast) alle bestehenden Kavernenspeicher
- Interkonnektoren wie in Enertile berechnet
- Effiziente Verbindung der Interkonnektoren unter Verwendung paralleler Infrastrukturen und nachgelagertes Einfügen der Speicher

## Entwicklung H<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Transportnetze

- Aufteilung Ursprungsnetz in zwei zusammenhängende Topologien
  - H<sub>2</sub>-Transportnetz
  - Schrittweise reduziertes Methan-Netz



# Agenda

---

---

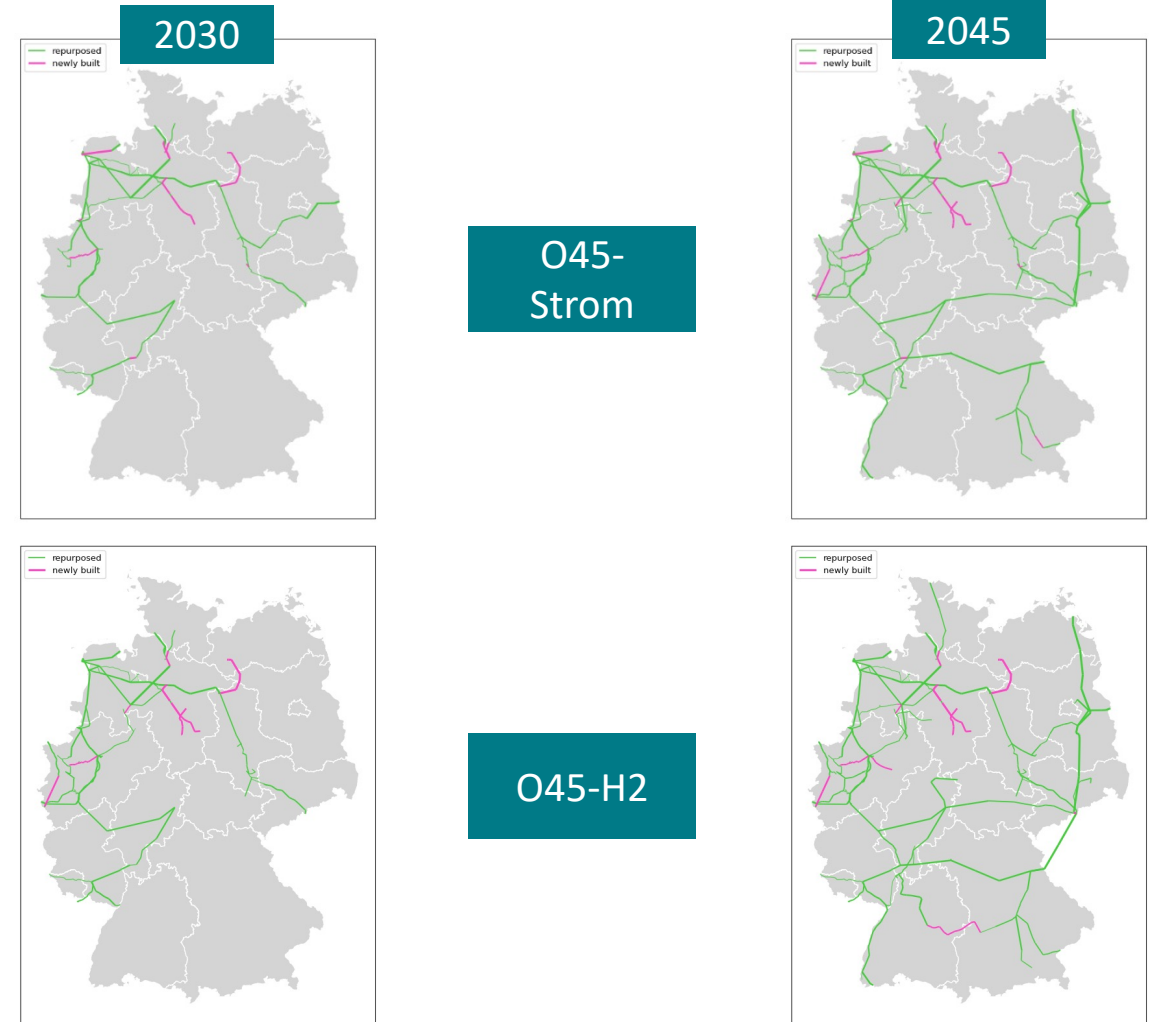
- Überblick zu den Modellierungsansätzen und wichtigen Annahmen
- **Entwicklung der deutschen Gastransportnetzinfrastrukturen für Wasserstoff und Erdgas**
- Strömungsmechanische Validierung der Gastransportnetzinfrastrukturen für Wasserstoff und Erdgas
- Einordnung des Infrastrukturbedarfs sowie der annuitätischen Gesamtkosten

# Gesamtüberblick der Wasserstoff-Topologieentwicklung

## Detailänderungen in den Topologien je nach Szenariodefinition

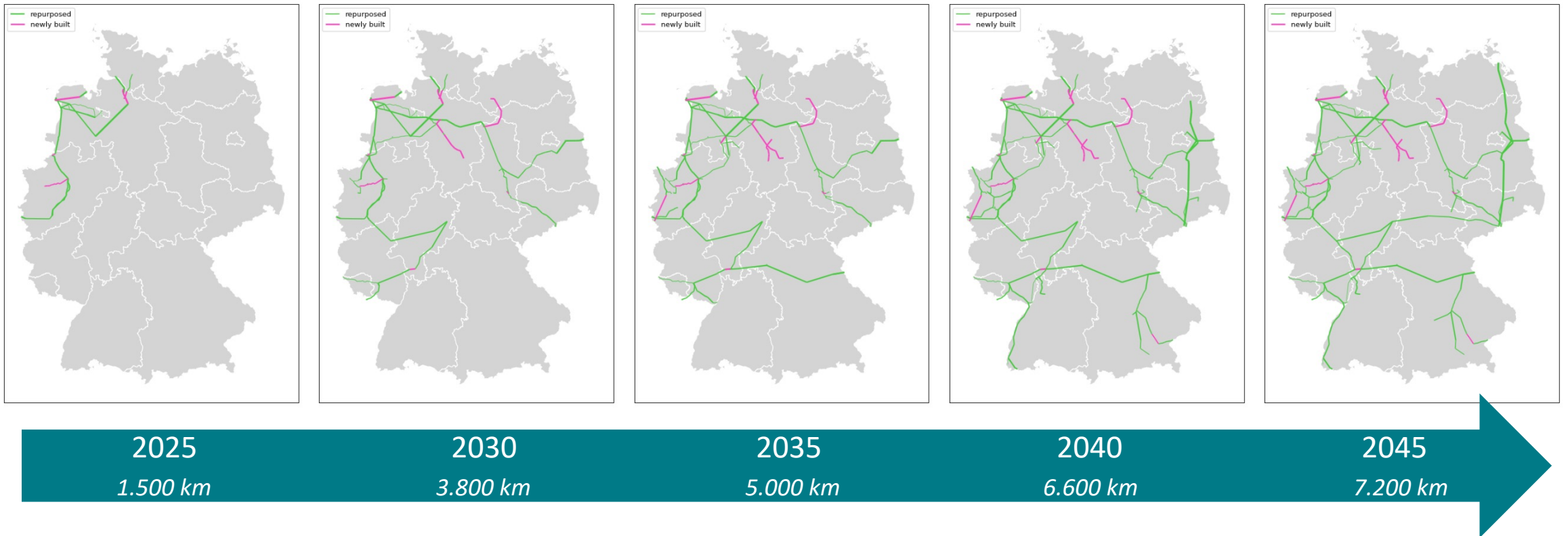
### ■ Ergebnisse und Einordnung

- Die Topologien basieren auf den jeweiligen Topologien der Szenarien T45-Strom\* und T45-H2
- Die verschiedenen Szenarien haben unterschiedliche Anforderungen an das Netz, was zu unterschiedlichen Längen und Umwidmungsraten sowie zu einigen Detailänderungen führt (z. B. Verbindung nach Polen in O45-Strom)
- Schwerpunkte Ein- und Ausspeisungen: Industrie, Kraftwerke, Produktion, Im-/Exporte und Speicher
- Transportnetze basieren auf einer gesamteuropäischen Optimierung; tatsächliche Netze könnten größer ausfallen
- Tatsächliche Importkorridore sind ebenfalls noch unsicher → Topologie ermöglicht Flexibilität



# Gesamtüberblick der Wasserstoff-Topologieentwicklung O45-Strom Topologie etwas kleiner als T45-Strom\*

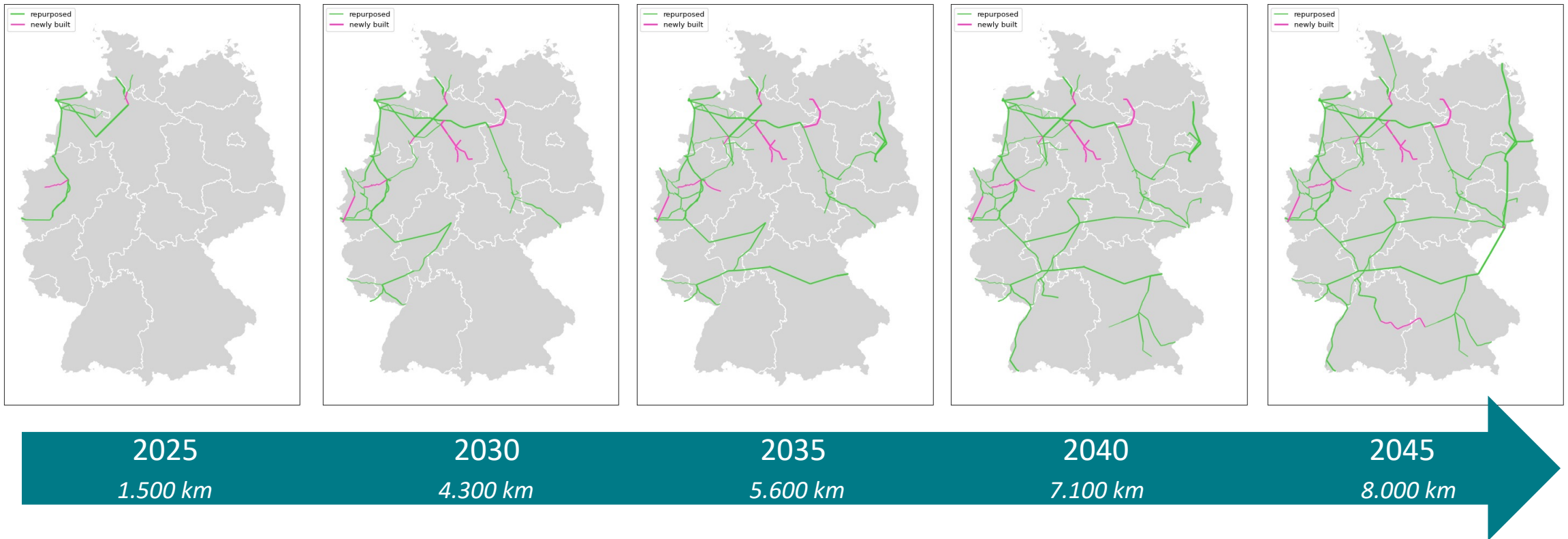
- Alle Szenarien basieren auf den T45-Grundtopologien, die vor der Kernnetz-Veröffentlichung modelliert wurden
- Unterschiedliche Umwidmungsraten und einige Detailänderungen aufgrund verschiedener Anforderungen



# Gesamtüberblick der Wasserstoff-Topologieentwicklung

## O45-H2 Topologie kleiner als T45-H2

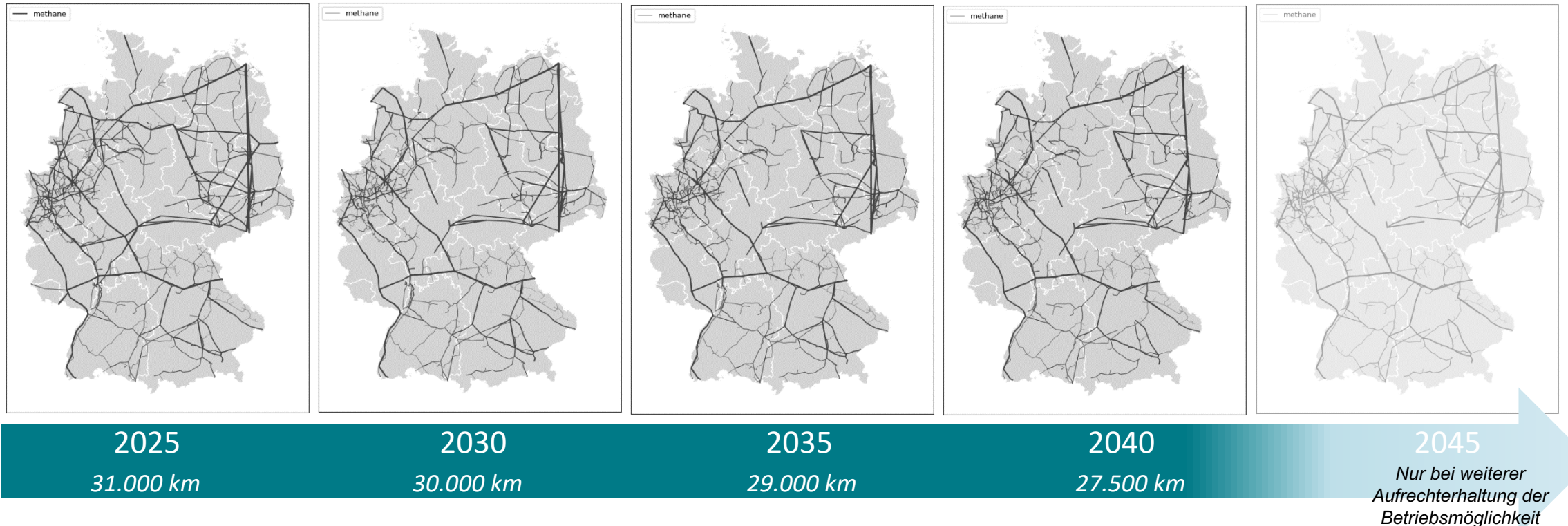
- Alle Szenarien basieren auf den T45-Grundtopologien, die vor der Kernnetz-Veröffentlichung modelliert wurden
- Unterschiedliche Umwidmungsraten und einige Detailänderungen aufgrund verschiedener Anforderungen





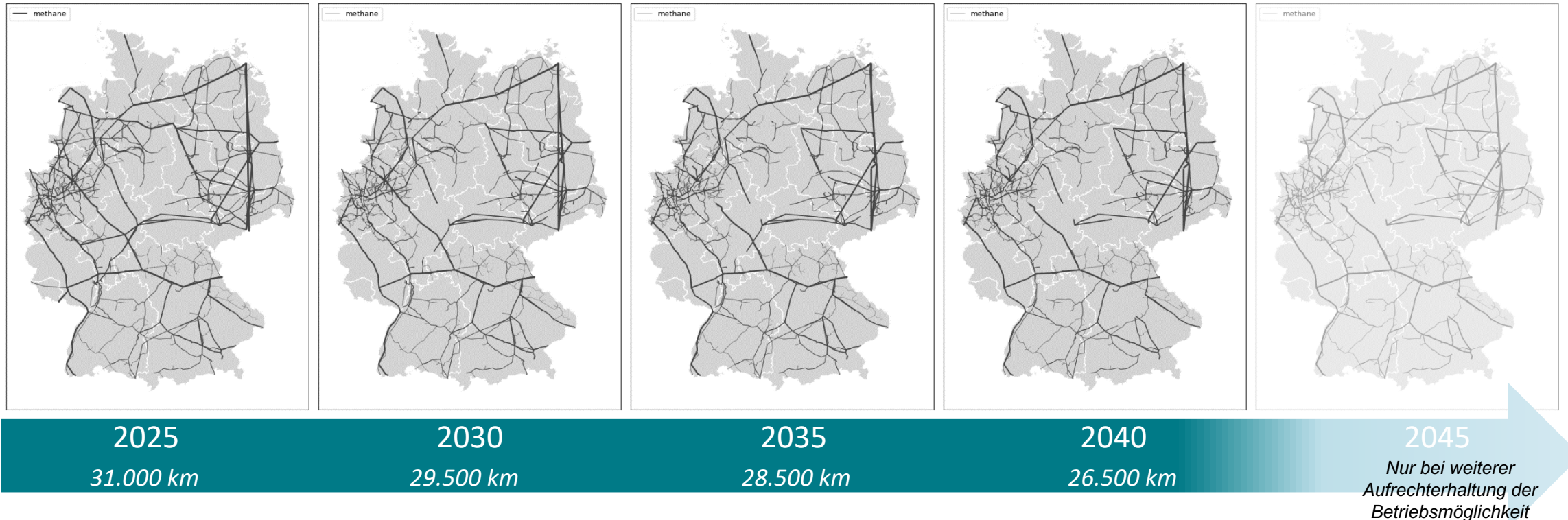
# Gesamtüberblick der Erdgas-Topologieentwicklung O45-Strom

- Reduktion des Erdgasnetzes aufgrund rückläufiger Erdgasbedarfe ermöglicht Umwidmung von Leitungen auf Wasserstoff
- Für die Gewährleistung der Erdgas-Versorgungsaufgabe werden je nach Anforderungen der Szenarien geringfügig Methanpipelines neu gebaut



# Gesamtüberblick der Erdgas-Topologieentwicklung O45-H2

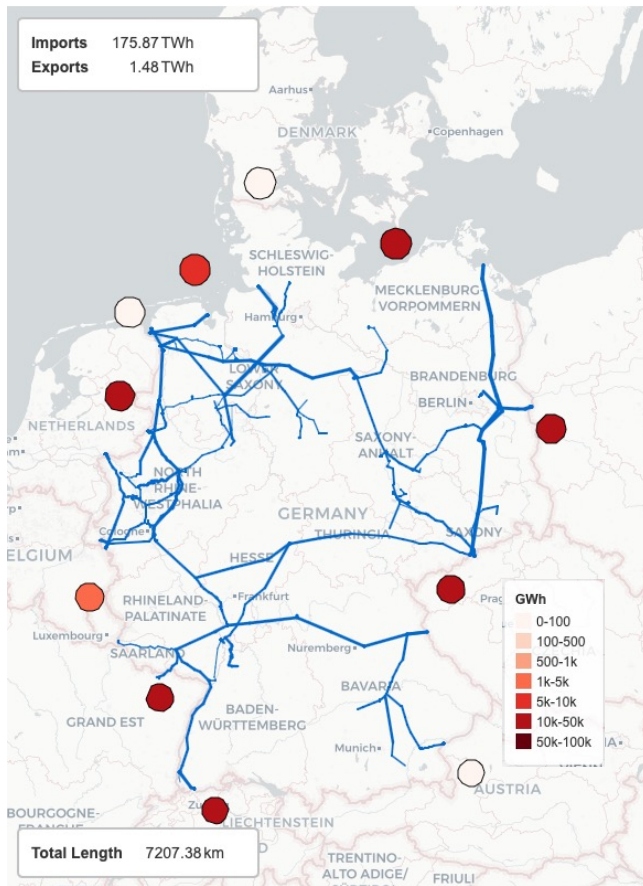
- Reduktion des Erdgasnetzes aufgrund rückläufiger Erdgasbedarfe ermöglicht Umwidmung von Leitungen auf Wasserstoff
- Für die Gewährleistung der Erdgas-Versorgungsaufgabe werden je nach Anforderungen der Szenarien geringfügig Methanpipelines neu gebaut



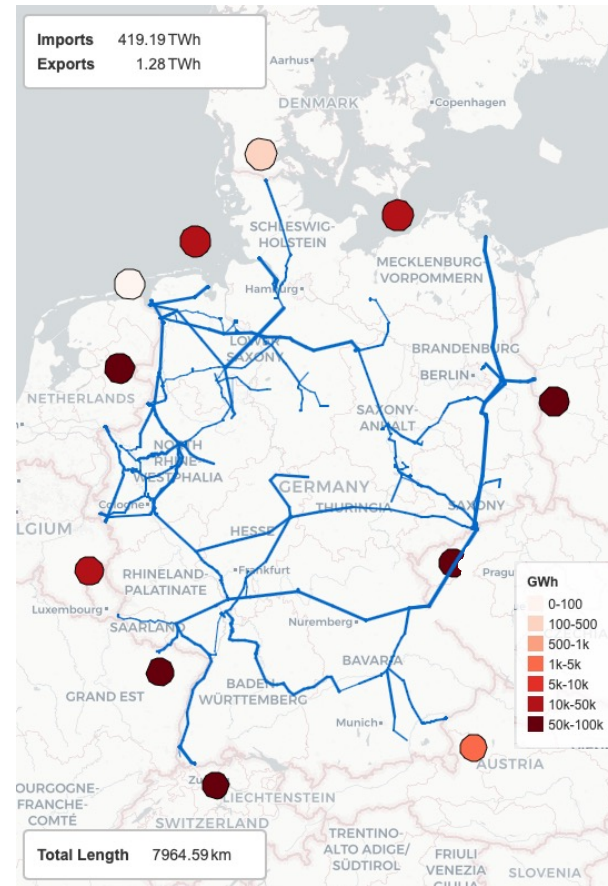
# Neuerungen in den O45-Szenarien

## Importe O45-H2 2045 deutlich höher als in O45-Strom

### O45-Strom



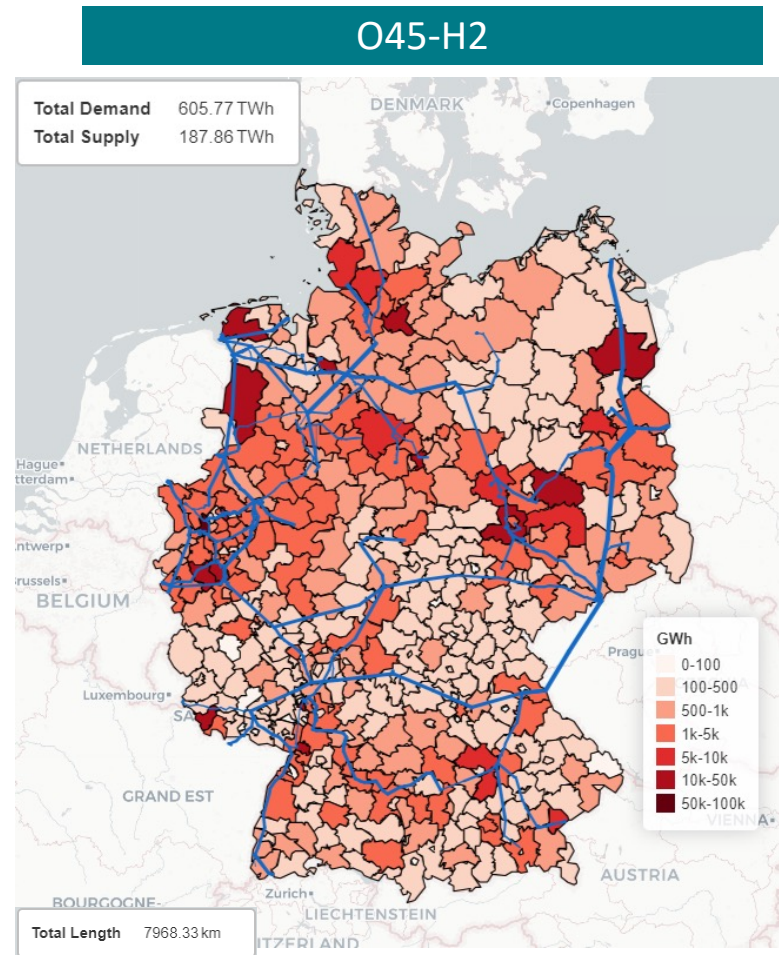
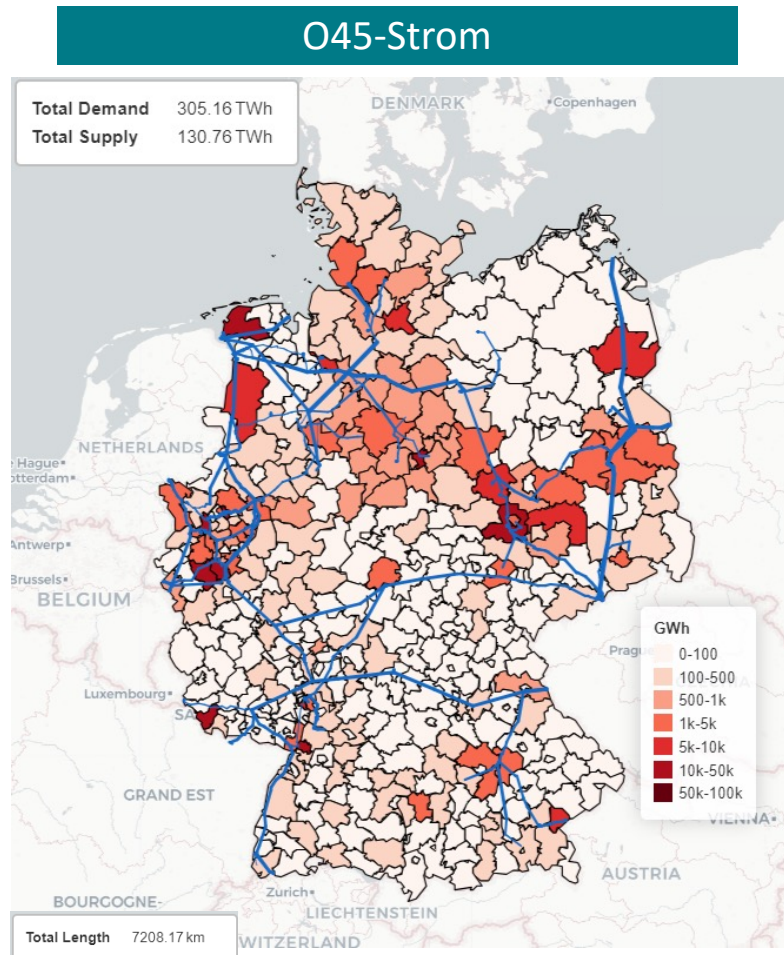
### O45-H2



- **O45-Strom**
  - Exporte gering
  - Nahezu alle Grenzübergangspunkte angeschlossen
  - Größte Importmengen aus Polen in Größenordnung von 50 TWh
  
- **O45-H2**
  - Exporte gering
  - Alle Grenzübergangspunkte angeschlossen
  - Größte Importmengen aus den Niederlanden in Größenordnung von 100 TWh

# Neuerungen in den O45-Szenarien

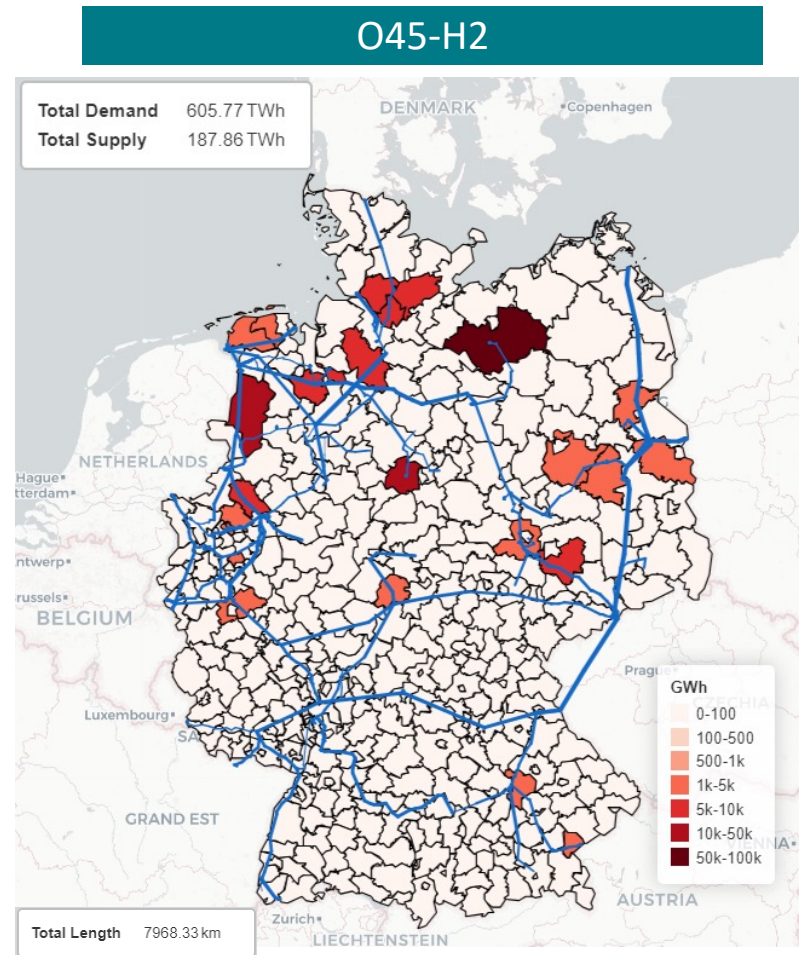
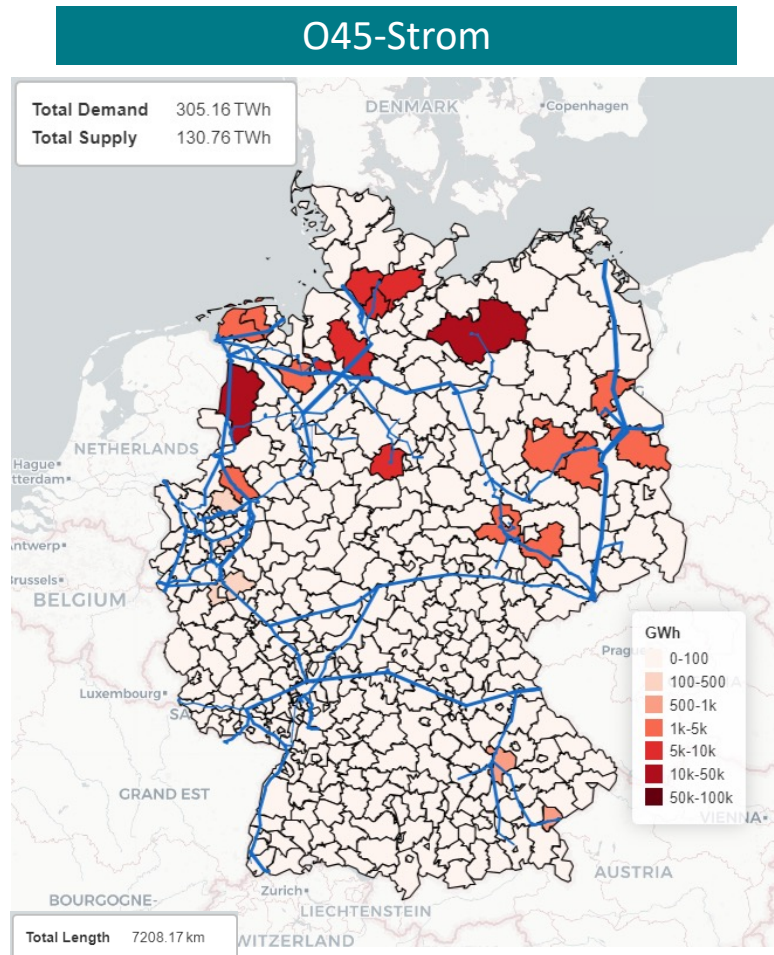
## Doppelt so große Wasserstoffnachfrage in O45-H2 2045



- **O45-Strom**
  - Nachfragecluster sind alle an das Wasserstofftransportnetz angebunden
  - Nachfrageschwerpunkte in der nördlichen Hälfte Deutschlands
- **O45-H2**
  - Flächendeckende Nachfrage von Wasserstoff bedingt durch Einsatz im Wärmesektor
  - Oft geringe Nachfragen und durch keine direkte Anbindung an das Wasserstofftransportnetz
  - Anbindung durch einzelne Verteilnetzleitungen

# Neuerungen in den O45-Szenarien

## Etwa 45 % höheres Wasserstoffangebot in O45-H2 2045

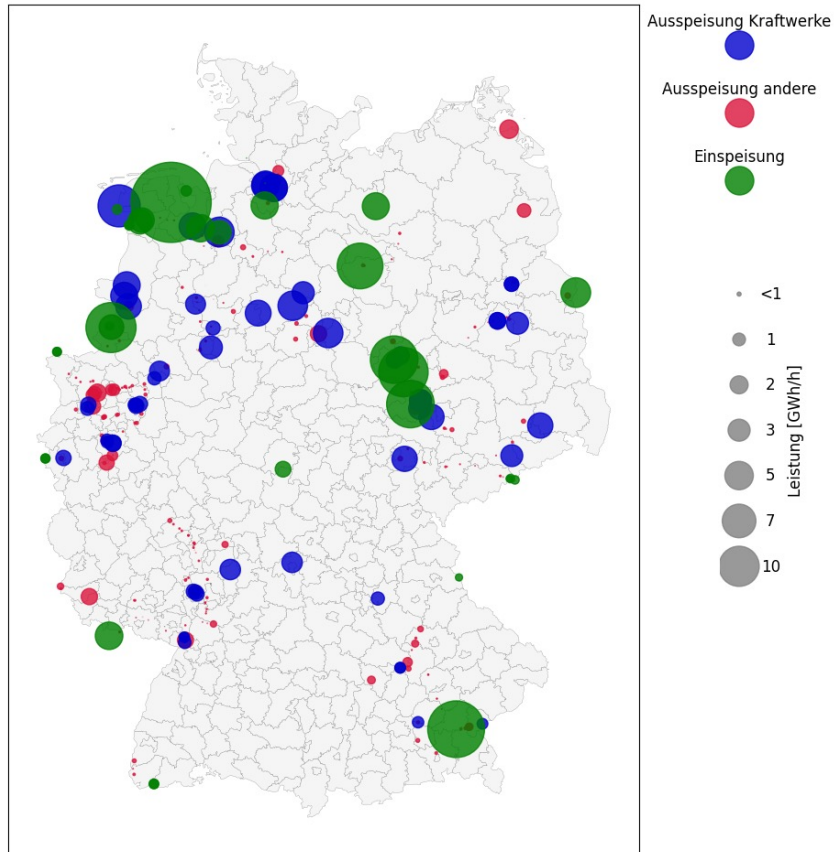


- **O45-Strom**
  - Im Jahr 2045 werden etwa 130 TWh Wasserstoff inländisch durch Elektrolyse erzeugt
  - Nahezu alle Regionen sind an das Wasserstofftransportnetz angeschlossen
- **O45-H2**
  - Anbindung von weiteren Elektrolysestandorten
  - Elektrolyse erzeugt etwa 60 TWh mehr Wasserstoff

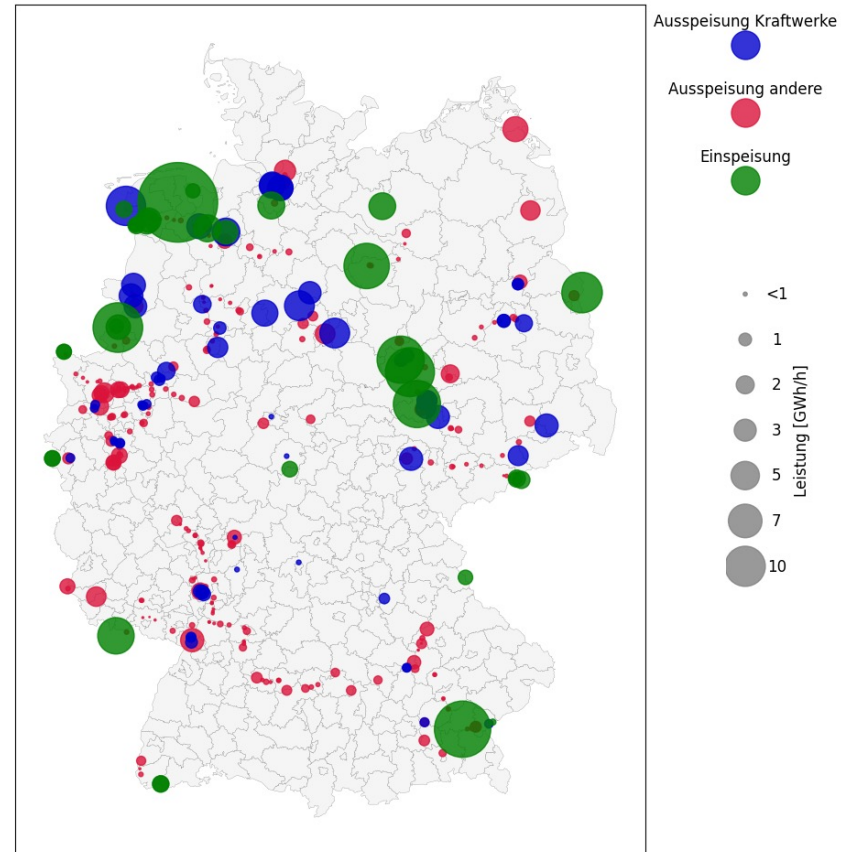
# Neuerungen in den O45-Szenarien

## Mehr Wasserstoffrückverstromung in O45-Strom

O45-Strom 2045



O45-H2 2045



- **O45-Strom**
  - Ähnliche Verteilung der Ein- und Ausspeisungen in der Höchstlaststunde
  - Mehr Kraftwerksleistung im O45-Strom
- **O45-H2**
  - Deutlich höhere Verbrauchsmengen, Leistungswerte (Abbildungen) steigen weniger stark
  - Größere Importe aus NL, FR, PL, CH und AUT

# Agenda

---

---

- Überblick zu den Modellierungsansätzen und wichtigen Annahmen
- Entwicklung der deutschen Gastransportnetzinfrastrukturen für Wasserstoff und Erdgas
- **Strömungsmechanische Validierung der Gastransportnetzinfrastrukturen für Wasserstoff und Erdgas**
- Einordnung des Infrastrukturbedarfs sowie der annuitätischen Gesamtkosten

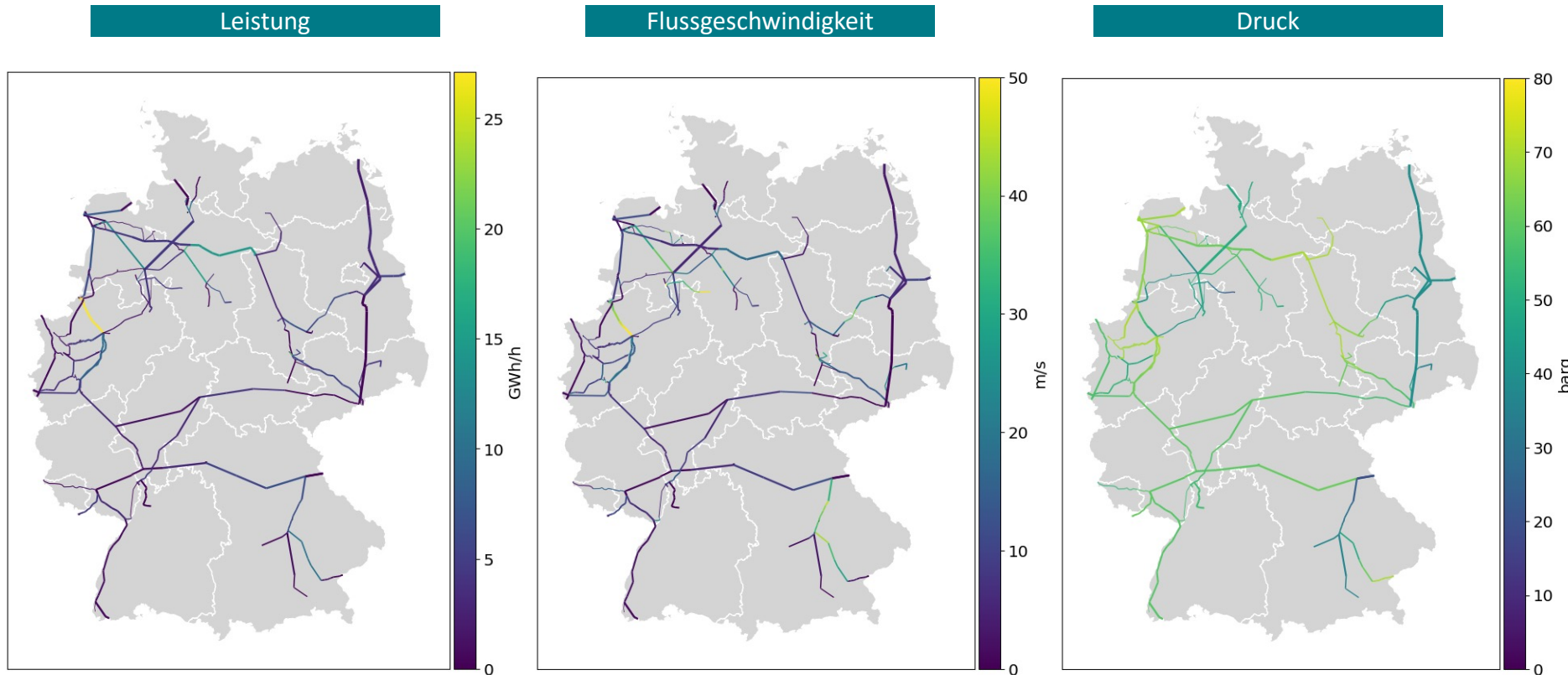
# Für alle Szenarien können Wasserstoffnetz-Topologien gebildet werden, die die Versorgungsaufgaben erfüllen

Szenario	O45-Strom					O45-H2				
	25	30	35	40	45	25	30	35	40	45
Gesamtsystemlast Maximal										
Gesamtnachfrage Minimal										
Verteilungsnetzausspeisung Maximal										
Kraftwerksausspeisung Maximal										
Industrieausspeisung Maximal										
Importe Maximal										
Speicherausspeisung Maximal										
Produktion Maximal										
Verteilungsnetzausspeisung Minimal										
Kraftwerksausspeisung Minimal										
Industrieausspeisung Minimal										
Importe Minimal										
Speicherausspeisung Minimal										
Produktion Minimal										



# O45-Strom: Simulation H2-2045 Für „Gesamtsystemlast Maximal“

Szenario	O45-Strom				
Netznutzungsfall/Jahr	25	30	35	40	45
Gesamtsystemlast Maximal					
Produktion Maximal					
Gesamtnachfrage Minimal					
Importe Minimal					



## Ergebnisse

- Versorgungsaufgabe für 2045 kann erfüllt werden
- Länge des Wasserstoffnetzes ca. 7.200 km (über 90% aus Umwidmung)

## Einordnung

- Leistungsflüsse bis 25 GWh/h in einzelnen Leitungen
- Flussgeschwindigkeiten bis etwa 45 m/s
- Drücke bis etwa 80 bar

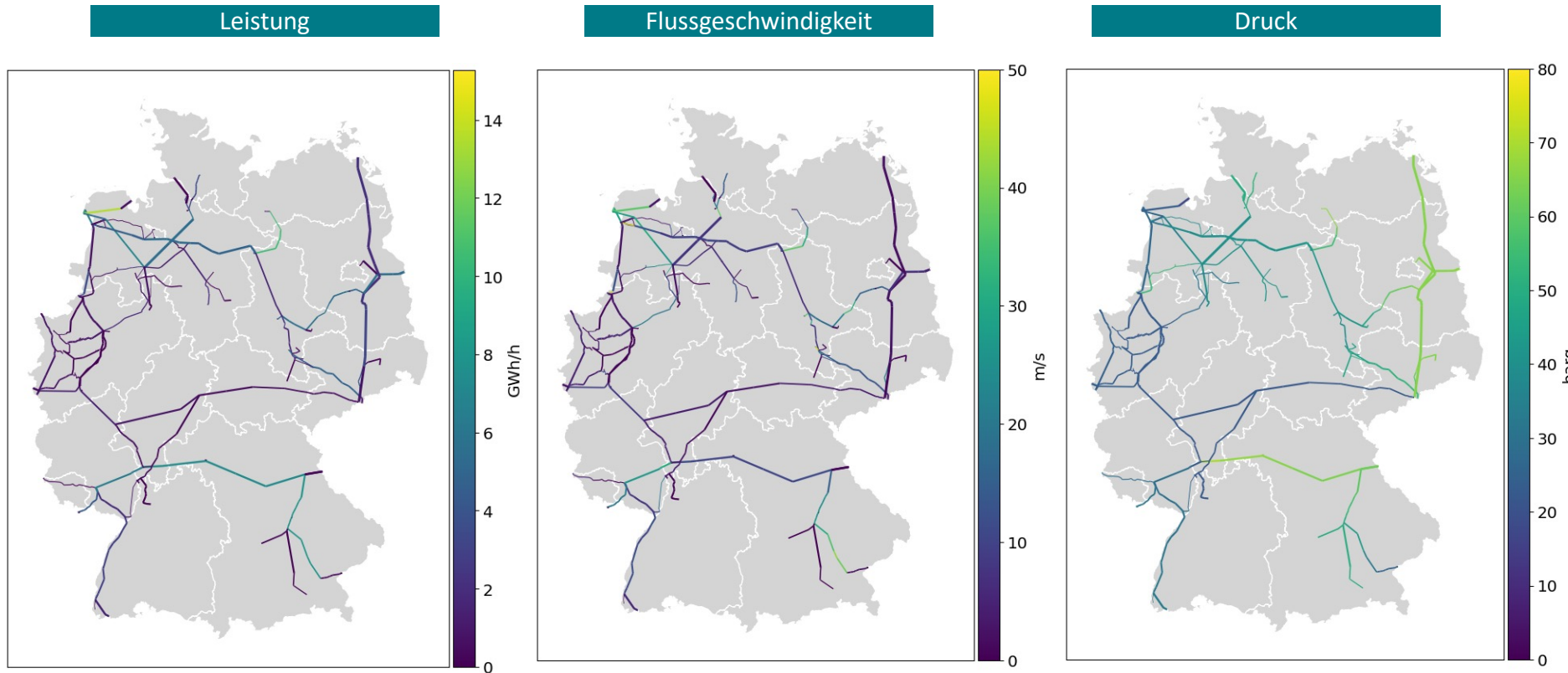
## Schlussfolgerung

- Aufbau eines Wasserstoffnetzes weitgehend durch Umwidmung bestehender Erdgaspipelines

# O45-Strom: Simulation H2-2045

## Für „Produktion Maximal“

Szenario	O45-Strom				
	25	30	35	40	45
Netznutzungsfall/Jahr					
Gesamtsystemlast Maximal					
<b>Produktion Maximal</b>					
Gesamtnachfrage Minimal					
Importe Minimal					



### Ergebnisse

- Versorgungsaufgabe für 2045 kann erfüllt werden
- Länge des Wasserstoffnetzes ca. 7.200 km (über 90% aus Umwidmung)

### Einordnung

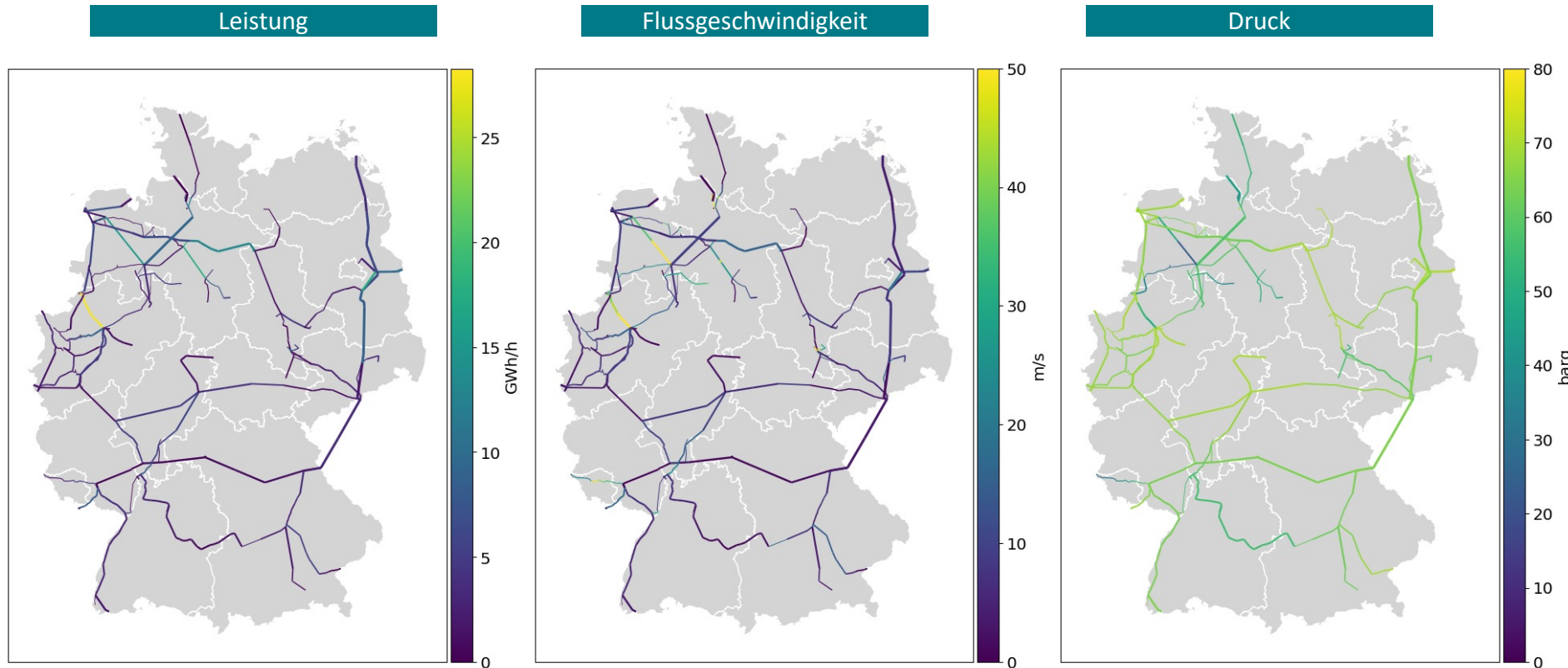
- Leistungsflüsse bis 12 GWh/h in einzelnen Leitungen
- Flussgeschwindigkeiten bis etwa 35 m/s
- Drücke bis etwa 70 bar

### Schlussfolgerung

- Aufbau eines Wasserstoffnetzes weitgehend durch Umwidmung bestehender Erdgaspipelines

# O45-H2: Simulation H2-2045 Für „Gesamtsystemlast Maximal“

Szenario	O45-H2				
Netznutzungsfall/Jahr	25	30	35	40	45
Gesamtsystemlast Maximal					
Importe Maximal					
Gesamtnachfrage Minimal					
Importe Minimal					



## Ergebnisse

- Versorgungsaufgabe für 2045 kann erfüllt werden
- Länge des Wasserstoffnetzes ca. 8.000 km (über 90% aus Umwidmung)

## Einordnung

- Leistungsflüsse bis 25 GWh/h in einzelnen Leitungen
- Flussgeschwindigkeiten bis etwa 45 m/s
- Drücke bis etwa 80 bar

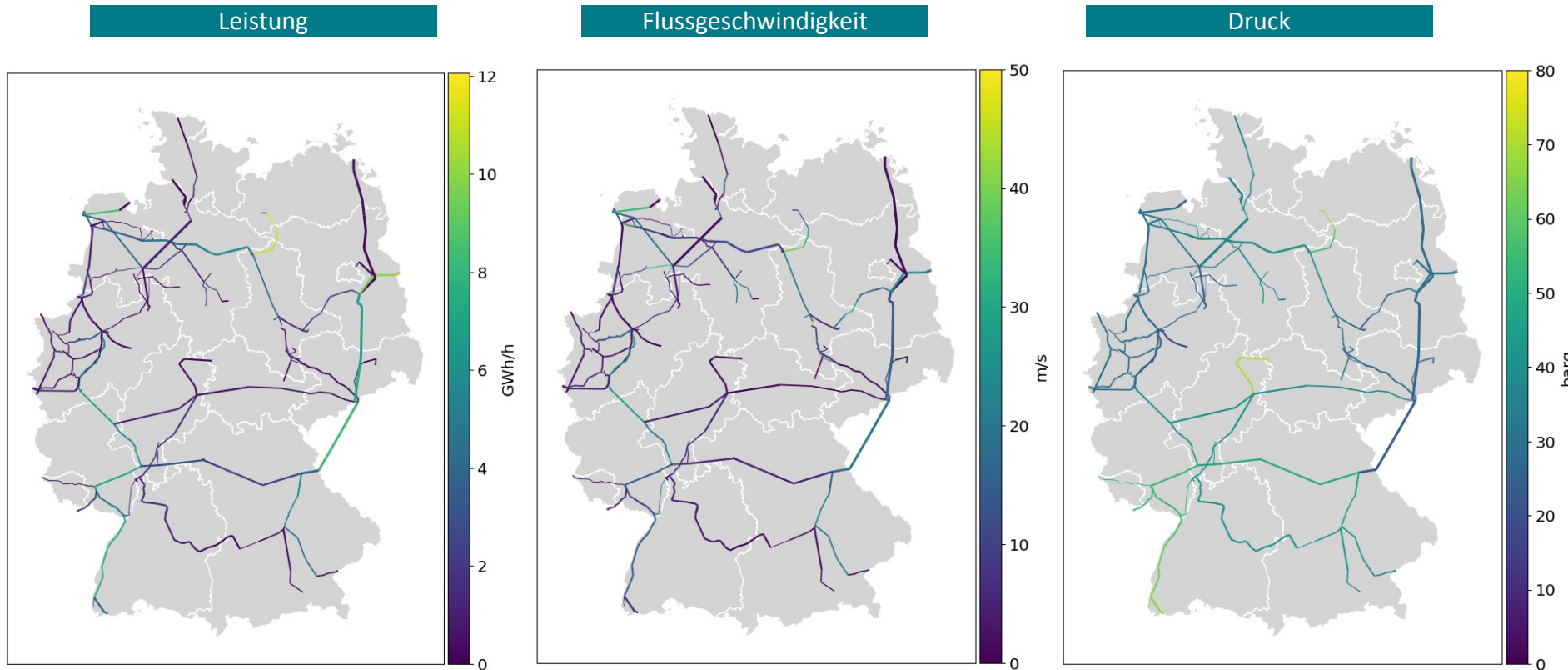
## Schlussfolgerung

- Aufbau eines Wasserstoffnetzes weitgehend durch Umwidmung bestehender Erdgaspipelines

# O45-H2: Simulation H2-2045

## Für „Importe Minimal“

Szenario	O45-H2				
	25	30	35	40	45
Netznutzungsfall/Jahr					
Gesamtsystemlast Maximal					
Produktion Maximal					
Gesamtnachfrage Minimal					
Importe Minimal					



### Ergebnisse

- Versorgungsaufgabe für 2045 kann erfüllt werden
- Länge des Wasserstoffnetzes ca. 8.000 km (über 90% aus Umwidmung)

### Einordnung

- Leistungsflüsse bis 12 GWh/h in einzelnen Leitungen
- Flussgeschwindigkeiten bis etwa 35 m/s
- Drücke bis etwa 70 bar

### Schlussfolgerung

- Aufbau eines Wasserstoffnetzes weitgehend durch Umwidmung bestehender Erdgaspipelines

# Für alle Szenarien verbleiben Erdgasnetz-Topologien, die die Versorgungsaufgaben erfüllen

Szenario	O45-Strom					O45-H2				
	25	30	35	40	45	25	30	35	40	45
Gesamtsystemlast Maximal		■	■	■			■	■	■	
Gesamtnachfrage Minimal										
Verteilungsnetzausspeisung Maximal		■	■	■			■	■	■	
Kraftwerksausspeisung Maximal										
Industrierausspeisung Maximal		■	■	■			■	■	■	
Importe Maximal										
Speicherausspeisung Maximal		■	■	■			■	■	■	
Andere Maximal		■	■	■			■	■	■	
Verteilungsnetzausspeisung Minimal										
Kraftwerksausspeisung Minimal										
Industrierausspeisung Minimal										
Importe Minimal										
Speicherausspeisung Minimal										
Andere Minimal										

# O45-Strom: Simulation CH4-2030 Für „Gesamtsystemlast Maximal“

Szenario	O45-Strom				
	25	30	35	40	45
Netznutzungsfall/Jahr					
Gesamtsystemlast Maximal					
Importe Maximal					
Importe Minimal					
Gesamtnachfrage Minimal					

## Ergebnisse

- Versorgungsaufgabe für 2030 kann erfüllt werden

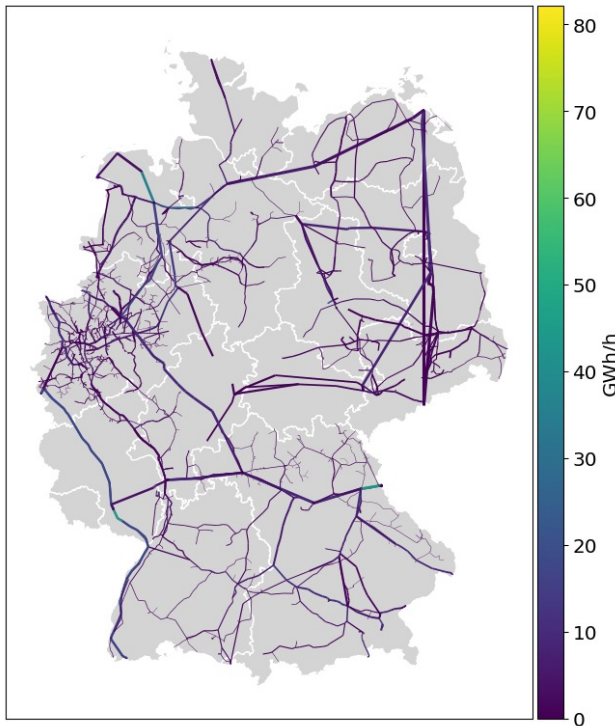
## Einordnung

- Zusammenhängende Simulation des Erdgastransportnetzes
- Leistungsflüsse bis 40 GWh/h
- Flussgeschwindigkeiten etwa 10-15 m/s
- Drücke bis etwa 80 bar

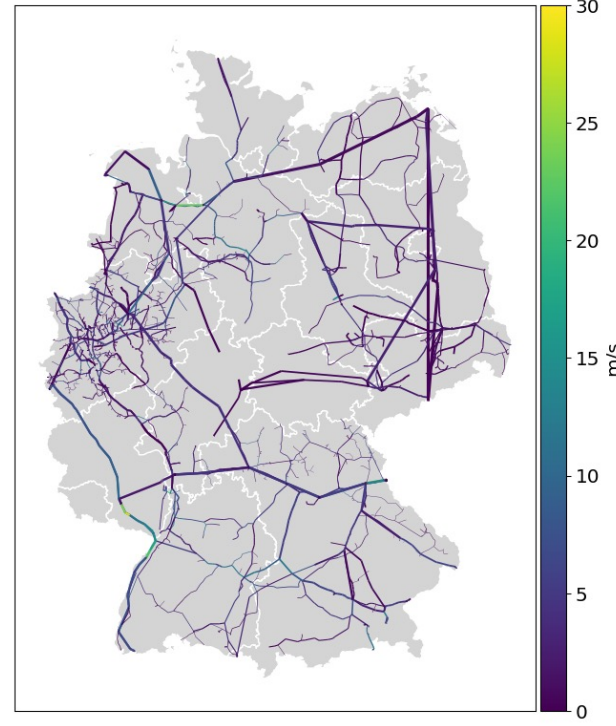
## Schlussfolgerung

- Erfüllung der Versorgungsaufgabe im Erdgasnetz trotz der Umwidmungen möglich

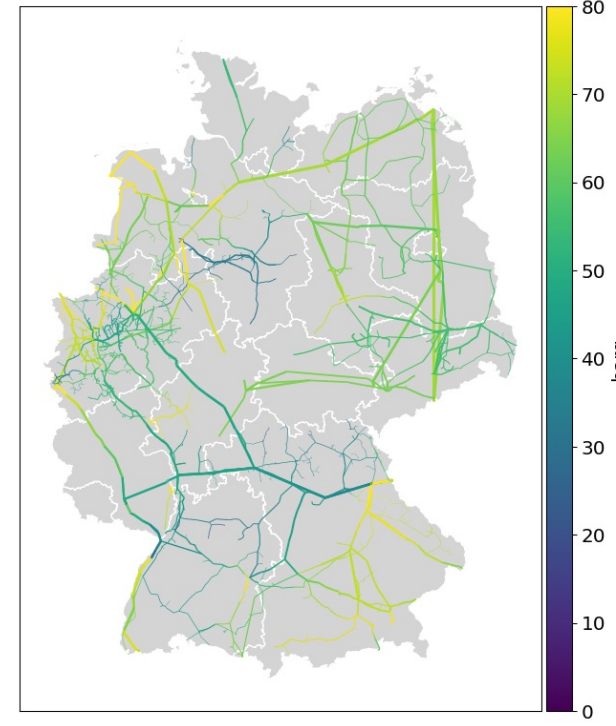
Leistung



Flussgeschwindigkeit



Druck



# O45-H2: Simulation CH4-2030 Für „Gesamtsystemlast Maximal“

Szenario	O45-H2				
	25	30	35	40	45
Netznutzungsfall/Jahr					
Gesamtsystemlast Maximal					
Importe Maximal					
Importe Minimal					
Gesamtnachfrage Minimal					

## ■ Ergebnisse

- Versorgungsaufgabe für 2030 kann erfüllt werden

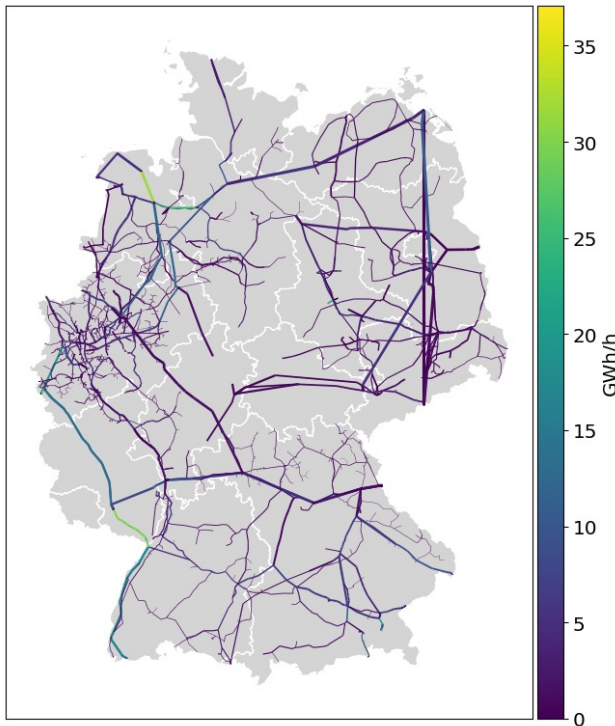
## ■ Einordnung

- Zusammenhängende Simulation des Erdgastransportnetzes
- Leistungsflüsse bis 35 GWh/h
- Flussgeschwindigkeiten etwa bis 20 m/s
- Drücke bis etwa 80 bar

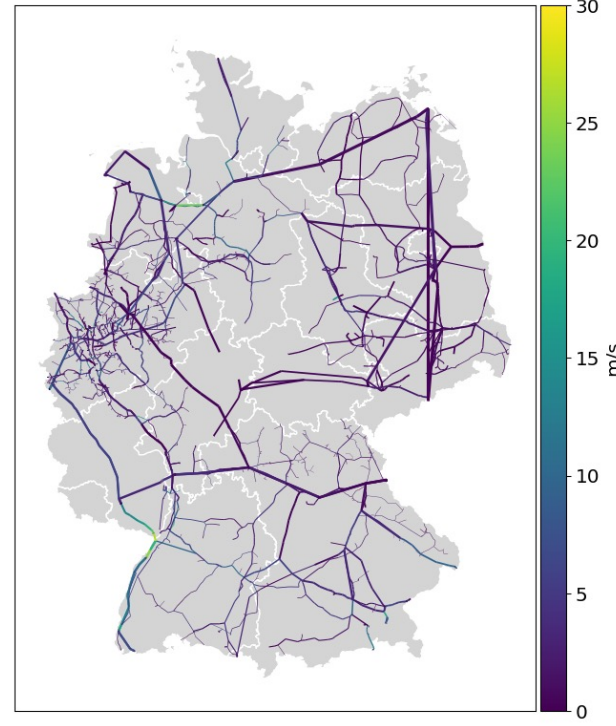
## ■ Schlussfolgerung

- Erfüllung der Versorgungsaufgabe im Erdgasnetz trotz der Umwidmungen möglich.

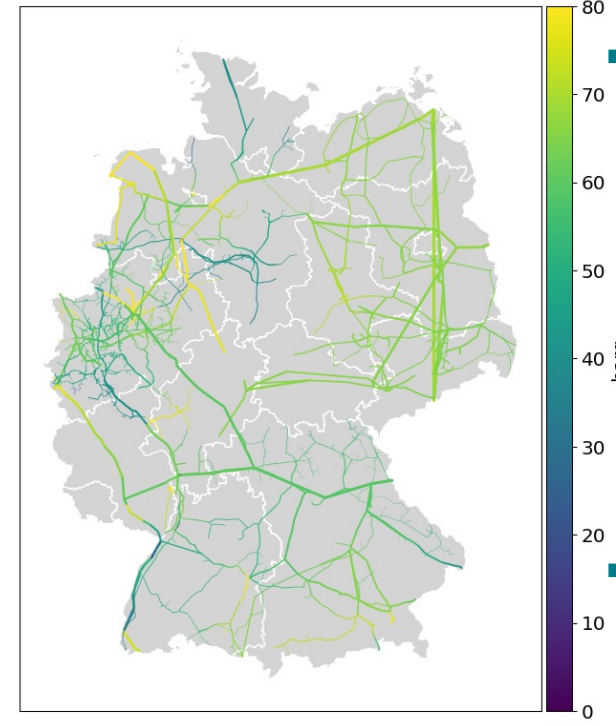
Leistung



Flussgeschwindigkeit



Druck



# Agenda

---

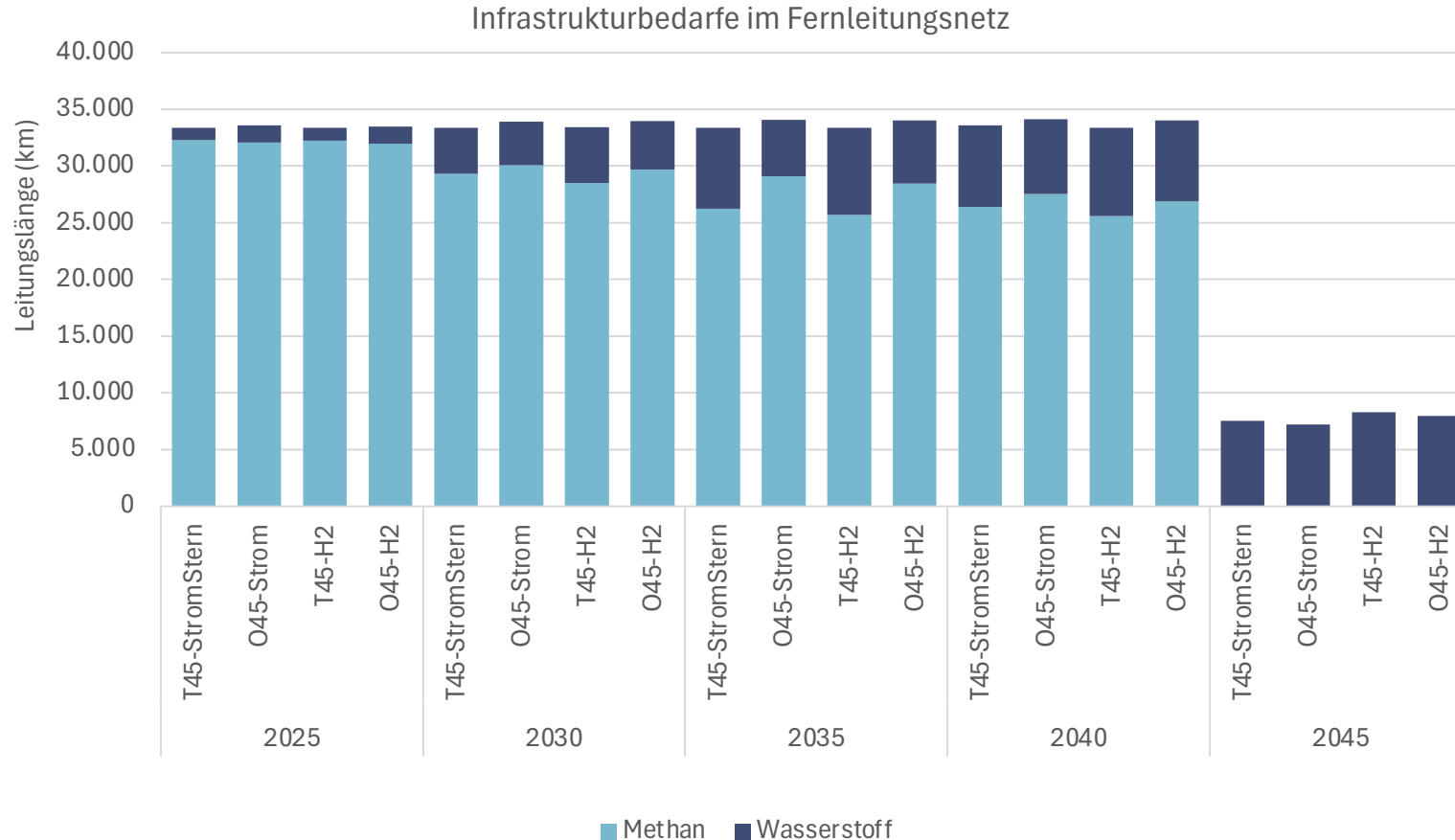
---

- Überblick zu den Modellierungsansätzen und wichtigen Annahmen
- Entwicklung der deutschen Gastransportnetzinfrastrukturen für Wasserstoff und Erdgas
- Strömungsmechanische Validierung der Gastransportnetzinfrastrukturen für Wasserstoff und Erdgas
- **Einordnung des Infrastrukturbedarfs sowie der annuitätischen Gesamtkosten**



# Analyse Fernleitungsnetze 1/4

## Wasserstoffnetz gegenüber dem Methannetz deutlich reduziert



### Ergebnisse

- Umwidmungen des CH<sub>4</sub>-Transportnetzes in beiden Szenarien in ähnlicher Größenordnung
- Geringe Variation zwischen den Topologien aufgrund der Szenarioanforderungen
- Vergleichsweise geringer Infrastrukturbedarf als heute
- Umfangreiches H<sub>2</sub>-Netz ab 2035 in beiden Szenarien
- Methannetz im Jahr 2045 nur bei Aufrechterhaltung der Betriebsmöglichkeit

### Einordnung

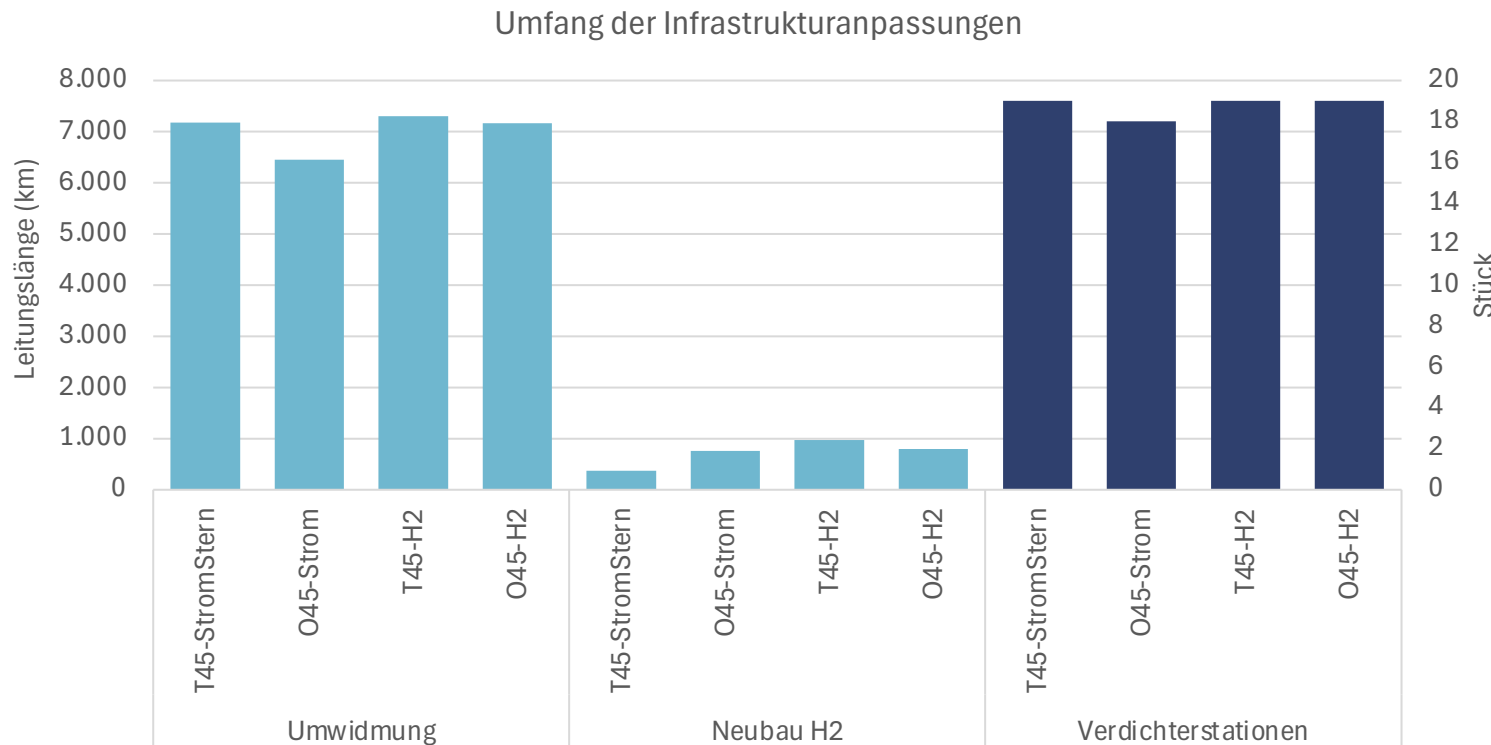
- Umfang des H<sub>2</sub>-Netzes im Jahr 2045 in beiden Szenarien ca. 7.200 bis 8.000 km

### Schlussfolgerung

- Wasserstofftransportnetz zentraler Baustein in allen Szenarien

# Analyse Fernleitungsnetze 2/4

## Umgewidmete Gasleitungen als Baustein der Wasserstoffnetze



### Ergebnisse

- Umfangreiche Maßnahmen zur Ertüchtigung des Gastransportnetzes auf Wasserstoff
- Weiterbetrieb für den Methantransport in allen Jahren und Szenarien bis 2045 (parallele Netzstruktur)

### Einordnung

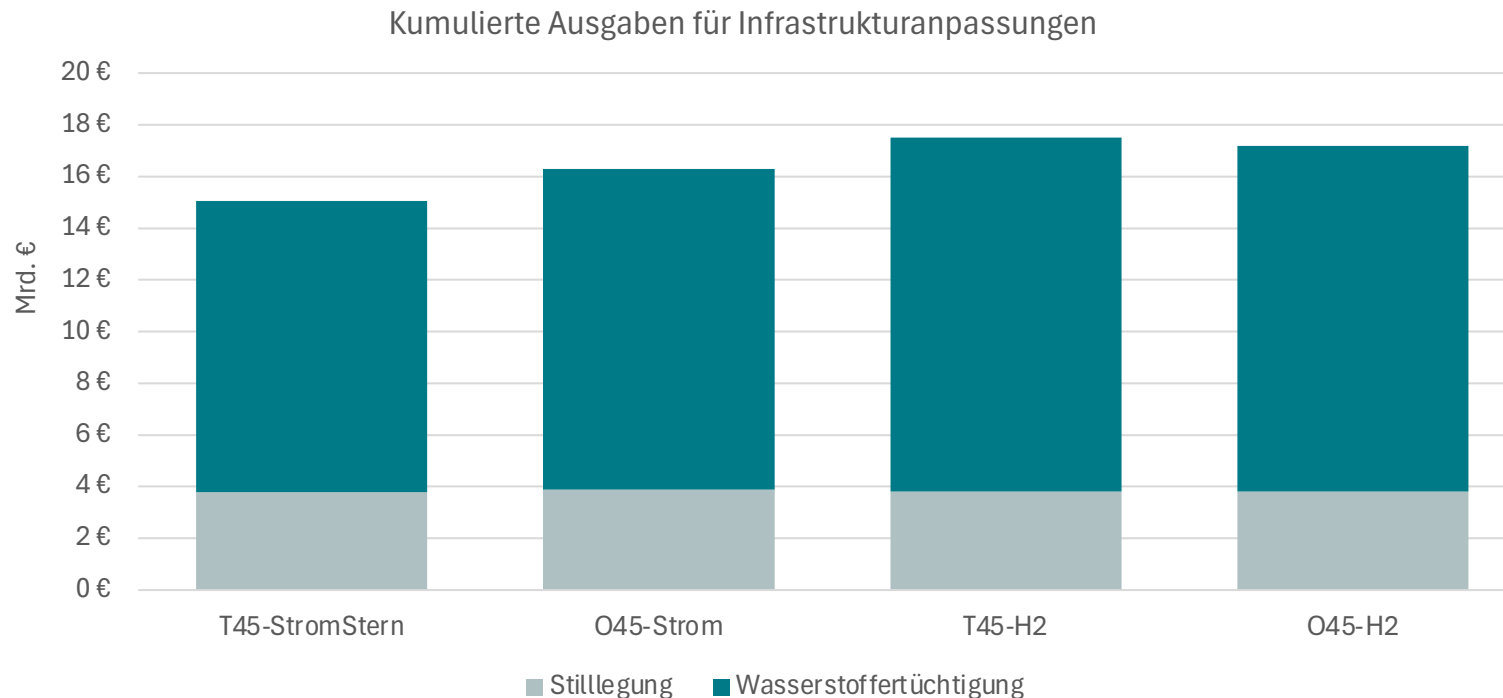
- Netztopologien basieren auf gesamteuropäischer Optimierung
- Genauere Prüfung der Stilllegungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen in der Umsetzung notwendig
- Starker Methanrückgang nach 2030 ermöglicht hohe Umwidmungsquote (etwa 90%)

### Schlussfolgerung

- Stilllegungen und Wasserstoffertüchtigung erfordern frühzeitige Planung- und Finanzierungsregelungen

# Analyse Fernleitungsnetze 3/4

## Wasserstoffnetz gegenüber dem Methannetz deutlich reduziert



### Ergebnisse

- Kumulierte Ausgaben für Infrastrukturanpassungen in allen Szenarien zwischen ca. 15 und 18 Mrd. € auf Transportnetzebene
- Vergleichsweise etwas höhere Kosten im O45-H2-Szenario aufgrund der größeren Anzahl angeschlossener Regionen
- Stilllegungsausgaben bei ca. 4 Mrd. €

### Einordnung

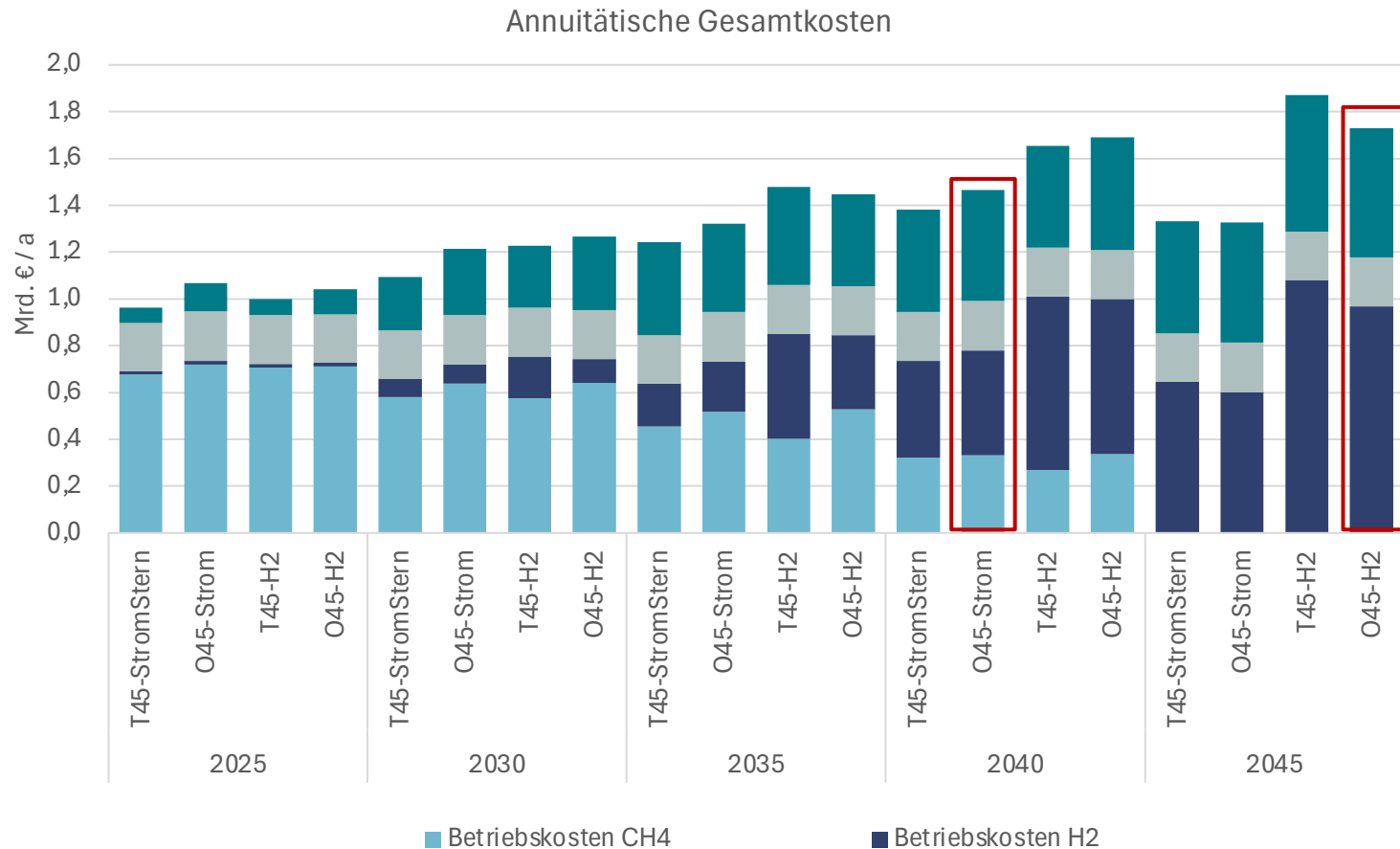
- Mindestens 70 % der Gesamtausgaben entfallen auf Wasserstoffertüchtigung

### Schlussfolgerung

- Finanzierungsbedarf mindestens 15 Mrd. € (einschließlich Stilllegungen)

# Analyse Fernleitungsnetze 4/4

## Betriebskosten stark von H2-Transportvolumen abhängig



### Ergebnisse

- Betriebskosten bestehen aus:
  - Fixkosten für die Netzinfrastruktur – abhängig von Netzlängen
  - Variablen Betriebskosten – abhängig von Transportmengen
- Annuitätische Gesamtkosten erreichen den Höhepunkt in O45-Strom im Jahr 2040 aufgrund des gleichzeitigen Betriebs des Wasserstoff- und Methannetze
- In O45-H2 sind die annuitätischen Gesamtkosten am höchsten im Jahr 2045 aufgrund des deutlich höheren Transportvolumens für H2

### Einordnung

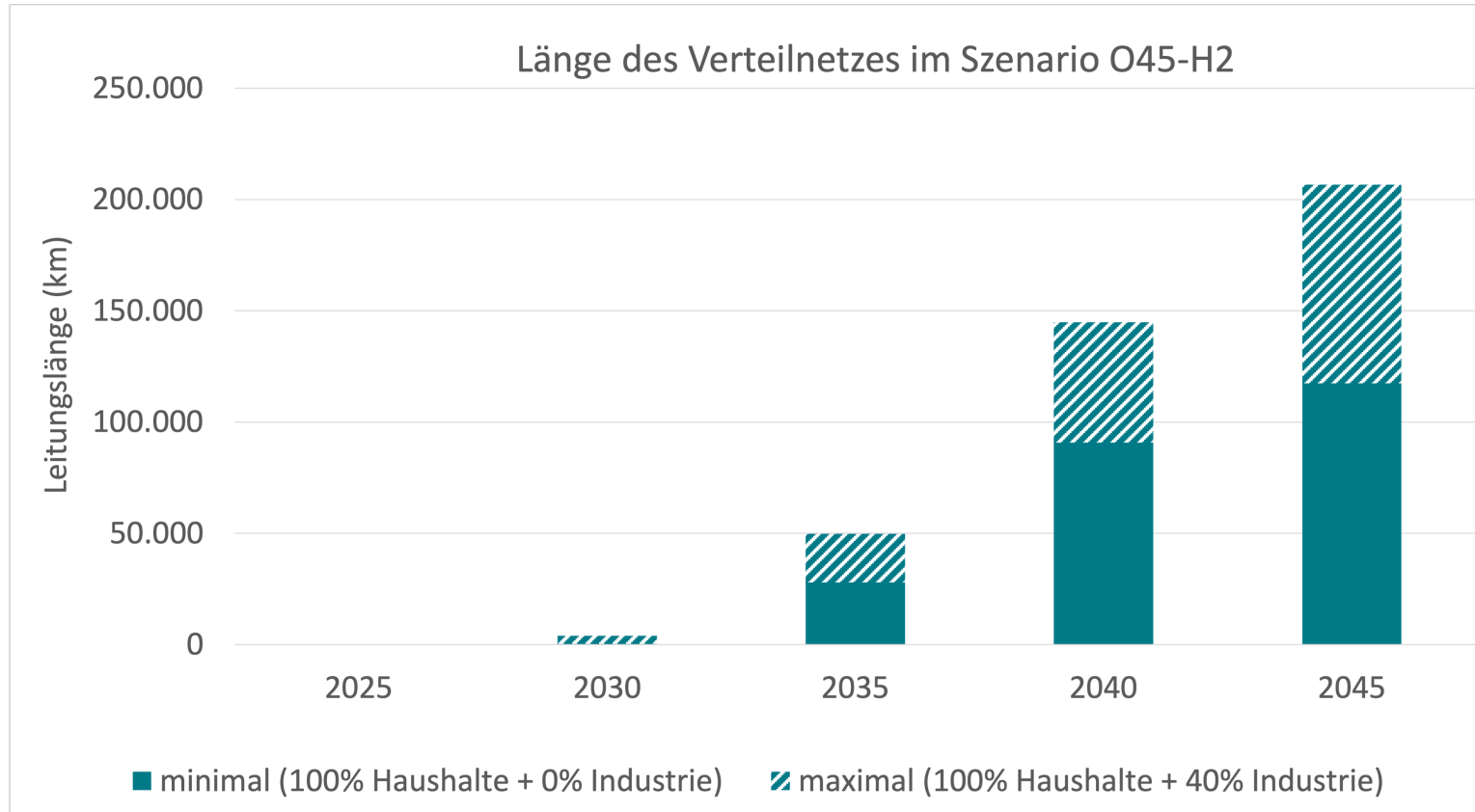
- Betriebskosten des Methannetzes rückläufig, während die des Wasserstoffnetzes zunehmend sind

### Schlussfolgerung

- Finanzierungs- und Regulierungsfragen für die Wasserstoffertüchtigung frühzeitig klären

# Analyse Verteilungsnetze 1/3

## Umwidmung der Verteilnetze bei Einsatz von H2 im Wärmesektor



### Ergebnisse

- Erheblicher Verteilnetzbedarf bei dem Einsatz von Wasserstoff im Wärmesektor
- Anbindung der Industrie über das Verteilnetz führt zu erheblichem Mehrbedarf an Leitungen

### Einordnung

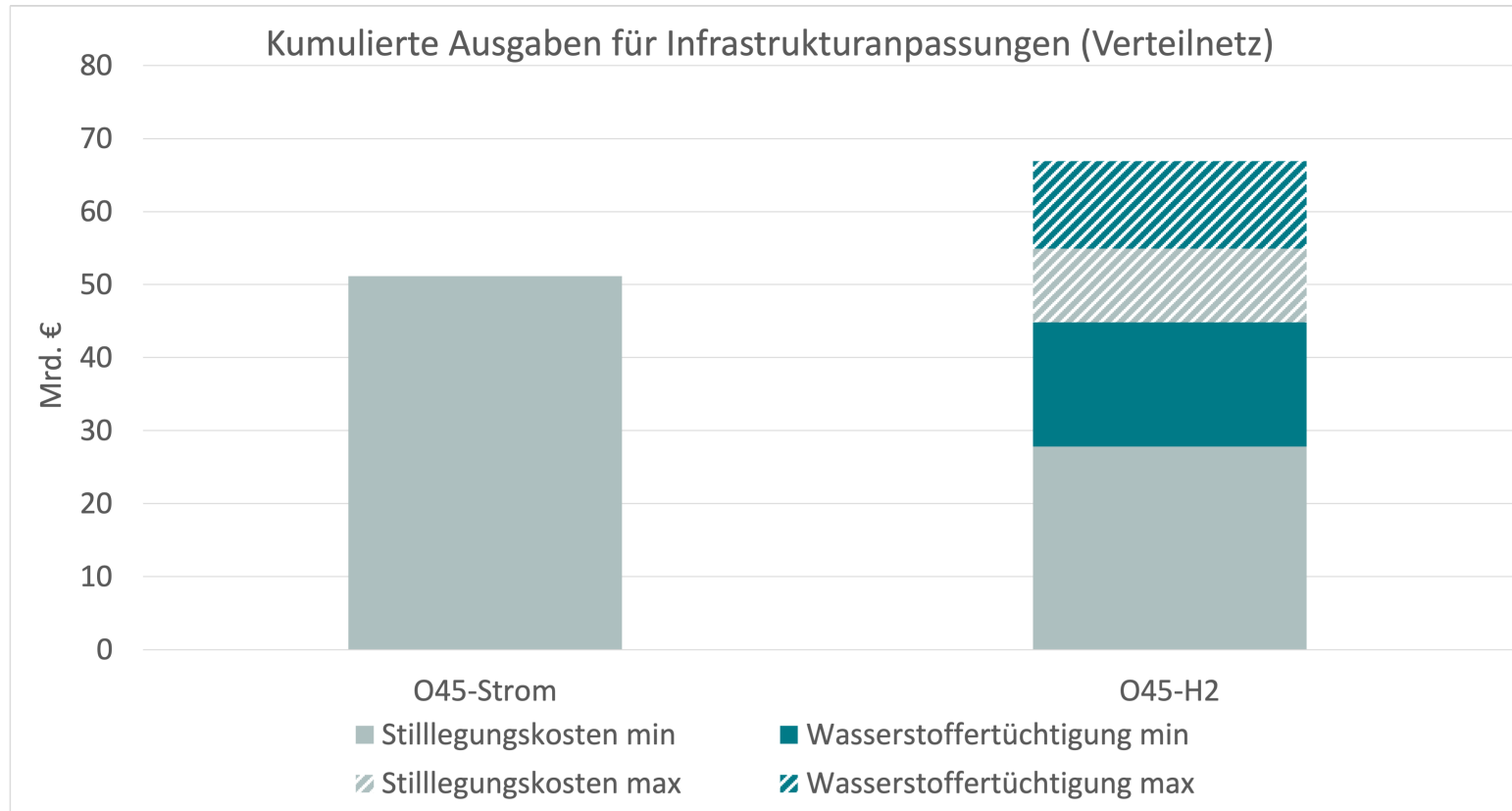
- Angenommen wurde eine ausschließliche Umwidmung von Verteilnetzleitungen
- Sinkende Verteilnetzlängen für Erdgas und vollständiger Rückbau bis 2045
- Keine Ausfallrechnungen für Erdgasverteilnetzleitungen

### Schlussfolgerung

- Für eine Versorgung der Haushalte mit Wasserstoff bedarf es einer umfassenden Verteilnetzinfrastruktur
- Die Anbindung weiterer Industriestandorte vergrößert diesen Bedarf signifikant

# Analyse Verteilungsnetze 2/3

## Stilllegungskosten der Verteilnetze betragen bis zu 50 Mrd. €



### Ergebnisse

- Kumulierte Ausgaben für Infrastrukturanpassungen auf Verteilnetzebene zwischen 50 Mrd. € und 70 Mrd. €
- Vergleichsweise höhere Kosten im O45-H2-Szenario aufgrund des Aufbaus eines Verteilnetzes für Wasserstoff
- Stilllegungsausgaben für Erdgasverteilnetze erheblich teurer als im Transportnetz

### Einordnung

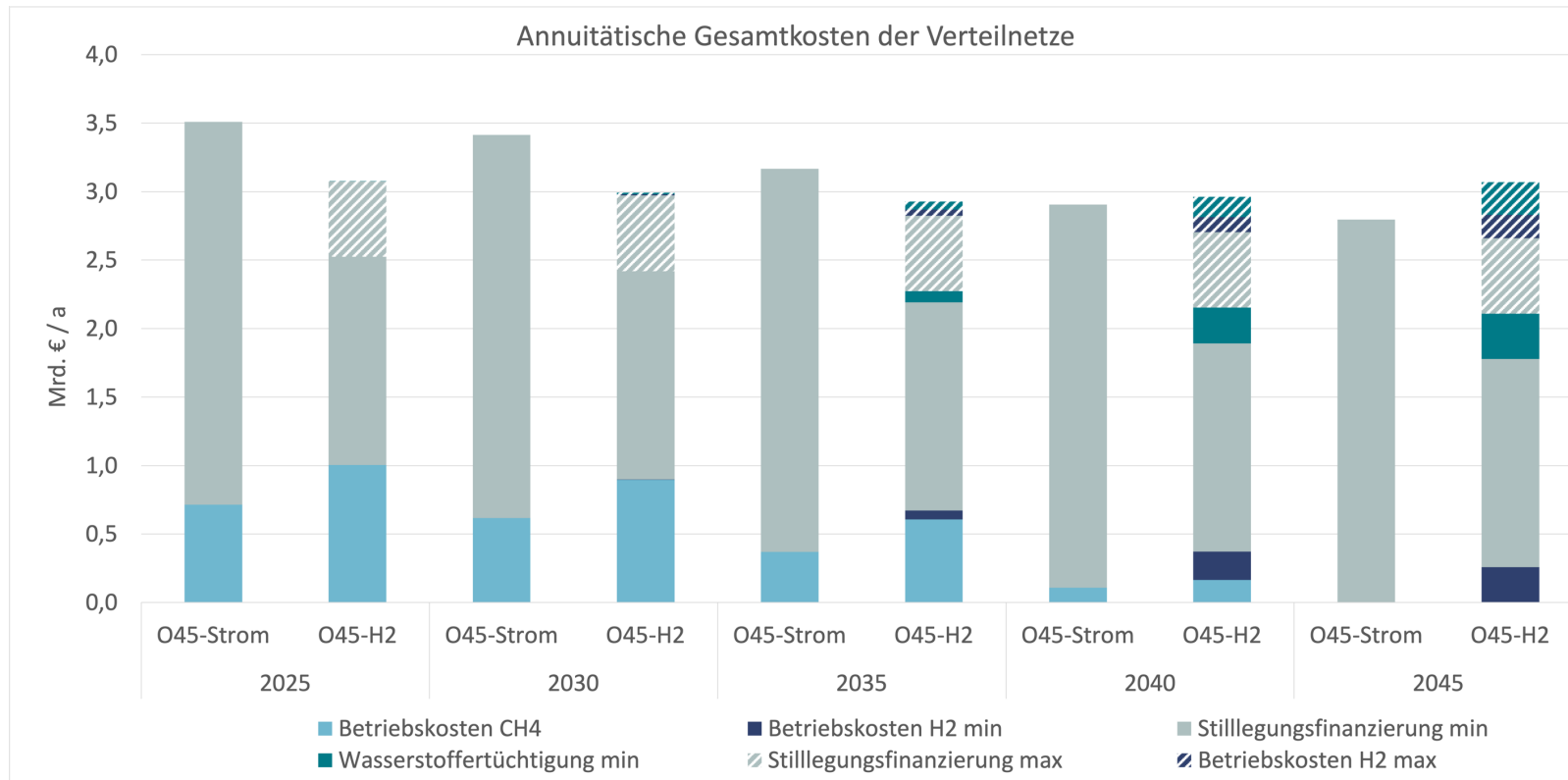
- Aufbau eines Verteilnetzes für Wasserstoff kostet zwischen 17 Mrd. € und 30 Mrd. €

### Schlussfolgerung

- Finanzierungsbedarf für Verteilnetzumstellung erheblich höher als für Transportnetze

# Analyse Verteilungsnetze 3/3

## Annuität der Verteilnetze von erheblicher Bedeutung



### Ergebnisse

- Betriebskosten für Wasserstoff hängen von Anschlussgrad der Industrie ab
- Annuitätische Gesamtkosten liegen in beiden O45-Szenarien bei etwa 3 Mrd. € / a

### Einordnung

- Größter Anteil der annuitätischen Kosten entfällt auf Stilllegung

### Schlussfolgerung

- Die annuitätischen Gesamtkosten pro Jahr übersteigen die der Transportnetzinfrastruktur etwa um den Faktor 2

# Fazit zur Gasnetzentwicklung

---

---

- In allen Szenarien ist ein umfangreicher Aufbau eines deutschen Wasserstofftransportnetzes erforderlich und kostenoptimal im Sinne der Optimierung der Kosten des Energieangebots; erheblicher Ausbau erfolgt auch außerhalb von Deutschland.
- Variation des Infrastrukturbedarfs der Szenarien O45-Strom und O45-H2 aufgrund der untersuchten Sensitivitäten im Vergleich zu T45-Strom\* und der T45-H2.
- Die Versorgungssicherheit ist für Wasserstoff in allen untersuchten Netznutzungsfällen gewährleistet.
- Bezüglich potenziell unterschiedlicher Entwicklungen des Wasserstoffeinsatzes im Wärmesektor sind die Auswirkungen auf die Transportinfrastrukturen begrenzt.
- Vergleichsweise geringe Unterschiede der Gesamtkosten weisen darauf hin, dass Mehrkosten für robuste und resiliente Netzplanung keine dramatischen Auswirkungen haben.
- Hinsichtlich der Verteilnetzinfrastuktur ist der Leitungsmehrbedarf in O45-H2 gegeben und beeinflusst auch die Gesamtkosten.
- Der weit überwiegende Teil des Wasserstoffnetzes kann bei paralleler Erfüllung der Aufgaben des Erdgastransports aus dem bestehenden Erdgastransportnetz umgewidmet werden. (Ausreichende Verfügbarkeit auch von Import- und Elektrolysekapazitäten sowie Speichern ist hierfür essenziell.).
- Der Anteil der Kosten für die Anpassung der Gastransportinfrastruktur bewegt sich vermutlich im unteren einstelligen Prozentbereich der Gesamtsystemkosten.
- Die Kosten für den Aufbau einer Verteilnetzinfrastuktur für Wasserstoff übersteigen die notwendigen Investitionen in die Transportnetze erheblich.



Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!  
... dann mal los



[www.langfristszenarien.de](http://www.langfristszenarien.de)