



Fraunhofer
CINES

5. Juni 2025 / Fraunhofer CINES

Webinar: Methoden zur Bewertung von CO₂- Infrastrukturen

Agenda

10.30 Uhr Begrüßung und Überblick

Dr. Tobias Fleiter, Fraunhofer ISI

10:35: Von Energiewendeszenarien zu konkreten Anforderungen an zukünftige CO₂-Transportinfrastrukturen und Netztopologien

Dr. Marius Neuwirth, Luna Lütz, Fraunhofer ISI

11:10 Simulations- und Planungsmethoden für das zukünftige CO₂-Netz

Dr. Mehrnaz Anvari, Fraunhofer SCAI

11:35 Q&A / Diskussion

12:00 Ende der Veranstaltung

Webinar, 05.06.2025, Fraunhofer CINES

Einführung: Fraunhofer CINES und aktuelle Relevanz und Entwicklungen zum CO₂-System

Dr. Tobias Fleiter

Fraunhofer ISI

Fraunhofer CINES

Fraunhofer-Exzellenzcluster Integrierte Energiesysteme

Systemische Energieforschung

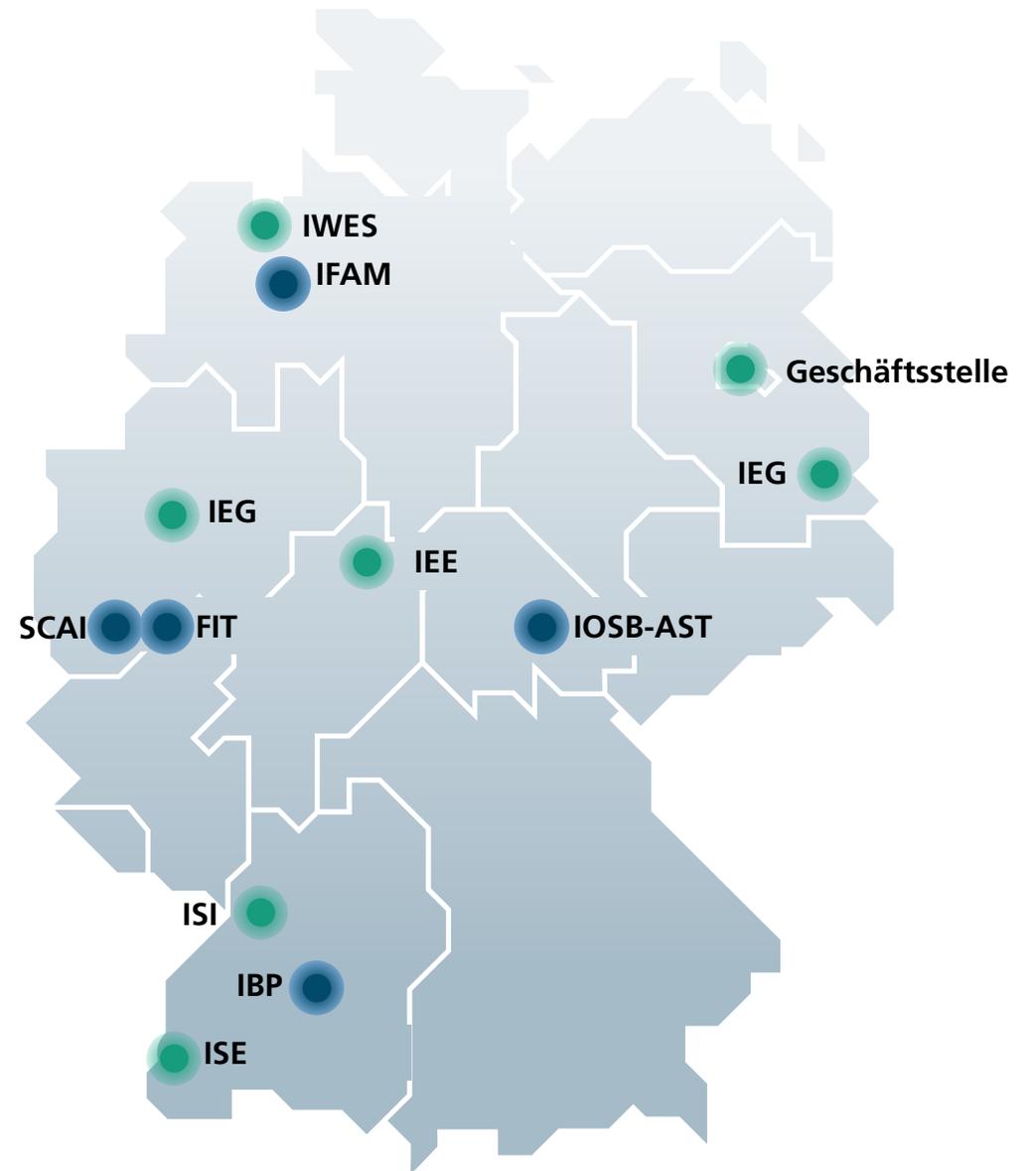
Fraunhofer CINES bündelt die vielfältigen Kompetenzen der Energieforschung aus aktuell zehn Fraunhofer-Instituten. Diese bilden die **systemischen Aspekte von Technologie und Ökonomie integrierter Energiesysteme** ab.

Kerninstitute

Fraunhofer ISE (Freiburg)
Fraunhofer ISI (Karlsruhe)
Fraunhofer IEE (Kassel)
Fraunhofer IEG (Cottbus, Bochum)
Fraunhofer IWES (Bremerhaven)

Assoziierte Institute

Fraunhofer IOSB-AST
Fraunhofer IBP
Fraunhofer SCAI
Fraunhofer FIT
Fraunhofer IFAM



Fraunhofer CINES

Forschungsbereiche



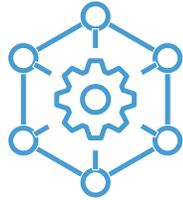
Energiesystemanalyse

- Kompass für die Systemtransformation
- Globale, regionale und Vor-Ort-Ebene
- Modelle, Szenarien und Transformationspfade
- Technologiebewertung auf systemischer Ebene

Leitung:

Dr. Tobias Fleiter

tobias.fleiter@isi.fraunhofer.de
+49 721 6809-208



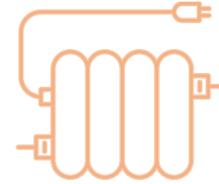
Digitalisierung

- Energiemonitoring und -steuerung
- Energiedatenräume
- Anlagenkommunikation
- KI
- Cybersicherheit
- Test- und Simulationsumgebungen

Leitung:

Manuel Wickert

manuel.wickert@iee.fraunhofer.de
+49 561 7294-369



Wärme

- Dekarbonisierung von Fern- und Prozesswärme
- Transformationsstrategien & Machbarkeitsstudien
- Erschließung von Wärmequellen und -speichern
- Testumgebungen

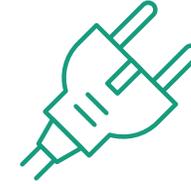
Leitung:

Anja Hanßke

anja.hansske@ieg.fraunhofer.de
+49 355 355 40-048

Dr. Alexander Heim

alexander.heim@ieg.fraunhofer.de
+49 234 33858-209



Leistungselektronik

- Hochdynamische Simulation elektrischer Systeme
- Effiziente Netzankopplung von Erzeugern, Verbrauchern und Speichern
- Regelung netzbildender Stromrichter
- Leistungselektronik für Elektrolyse und Wärmepumpen

Leitung:

Dr. Philipp Strauß

philipp.strauss@iee.fraunhofer.de
+49 561 7294-144

Aktuelle Entwicklung beim Aufbau des CO₂ Systems

Eckpunkte Carbon Management Strategie der Bundesregierung

- Speicherung voraussichtlich nur unter der Nordsee oder Export
- Abscheidung schwer vermeidbarer Emissionen der Industrie und Müllverbrennung, Negativemissionen sowie Stromerzeugung aus Gas und Biomasse (nicht Kohle)
- Verabschiedung des KSpTG steht noch aus

Norwegischer CO₂-Hub Northern Lights in Betrieb

- Erster großvolumiger Speicher 2024 in Betrieb genommen
- 1,5 Mt/a Speicherkapazität
- Viele weitere Projekte in Europa geplant

CO₂-Infrastruktur und CCS Priorität im Koalitionsvertrag

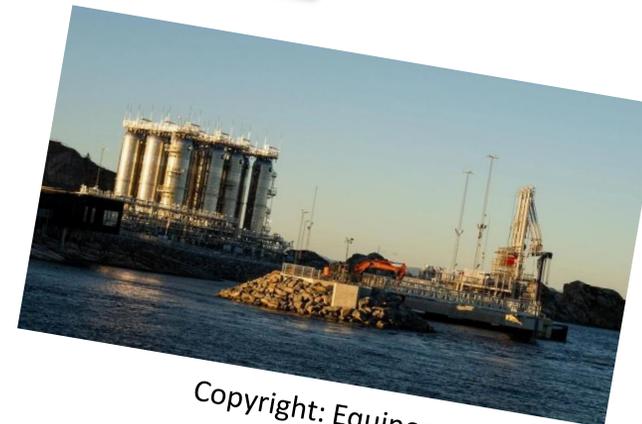
- KSpTG soll zügig verabschiedet werden
- Beispiel Wilhelmshaven: 2028 10 Mt/a per Schiff ab 2032 Pipeline

Aktivitäten der Industrie

- Ein „Startnetzentwurf“ von OGE im Jahr 2022 vorgestellt
- Seehäfen als CO₂-Hubs, Beispiel Wilhelmshaven mit Ziel für Schiffstransport ab 2028
- Zementhersteller konkretisieren CO₂-Abscheideprojekte



OGE-Startnetz [1]



Copyright: Equinor

Unser Fraunhofer-Methodenbaukasten

3 Ebenen der Systemplanung: Von der strategischen Systemanalyse zur physikalischen Netzauslegung

Strategische Systemanalyse



Infrastrukturbedarf



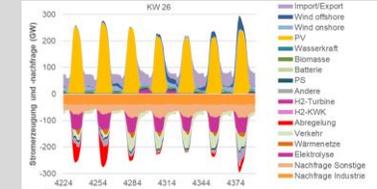
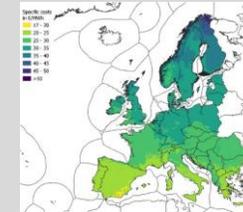
Netzplanung



1. Bewertung von Negativemissionstechnologien (NET) im Energiesystem

Energiesystemmodelle

- Investitions- und Einsatzoptimierung
- Standortoptimierung
- Sektorkopplung



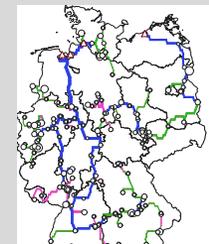
2. Systemisch konsistente Transformationsszenarien zur Topologieplanung

Simulation Technologiediffusion

- Szenarien Industrietransformation
- Standortscharfe Auflösung
- Materialflussmodellierung

Routing Optimierung

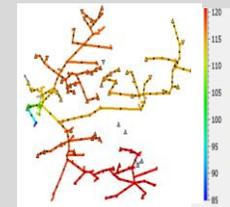
- Optimierte Netztopologie
- Systemkosten



3. Strömungsmechanische Simulation des Netzes

Strömungsmechanische Betriebssimulation

- Drücke u. Flussgeschwindigkeiten
- Risikoanalyse
- Flüssiger - versus gasförmiger Transport
- Bedarf Pumpen und Verdichter



Webinar, 05.06.2025, Fraunhofer CINES

Von Energiewendeszenarien zu Anforderungen an zukünftige CO₂-Transport-Infrastrukturen

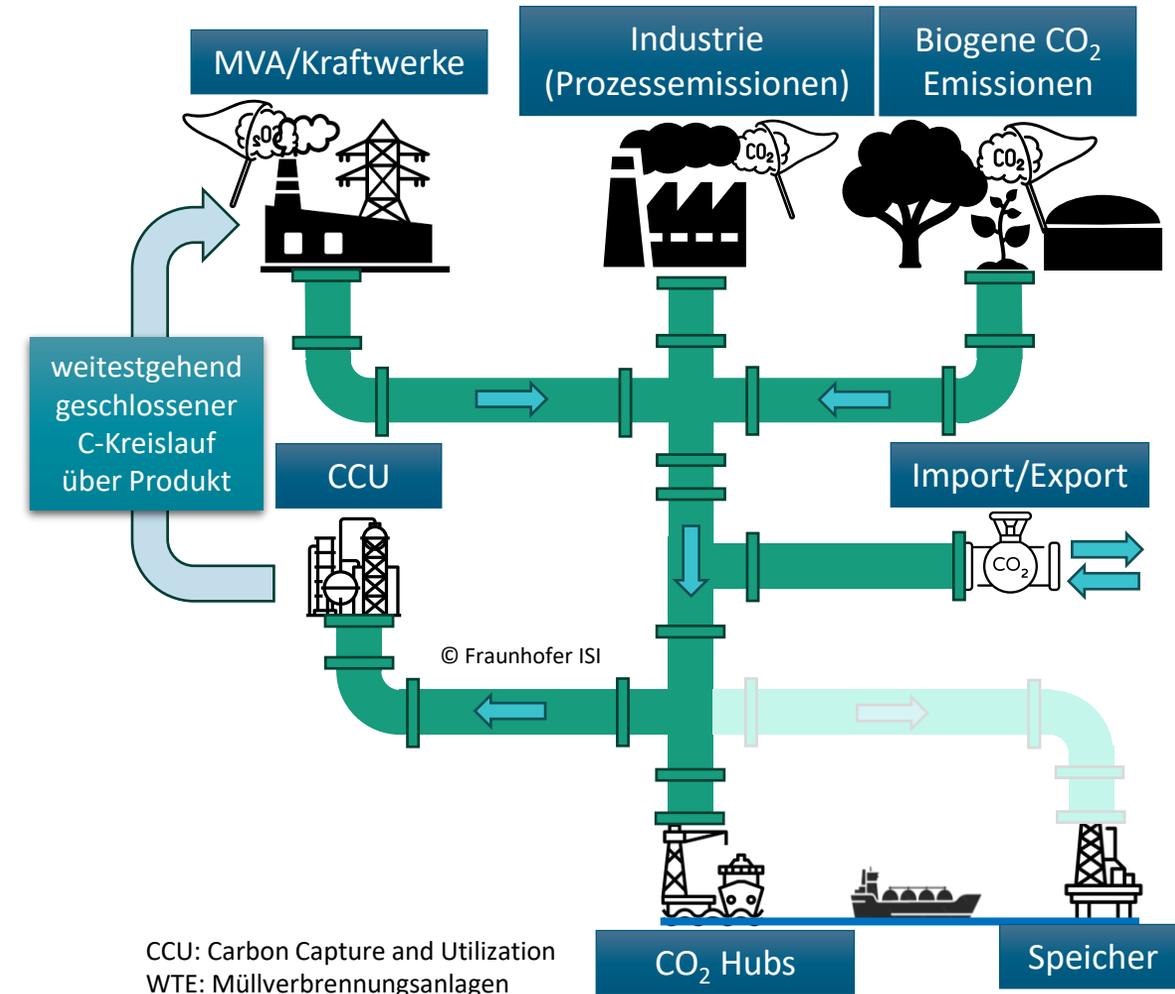
Dr. Marius Neuwirth, Luna Lütz

Fraunhofer ISI

Elemente eines möglichen zukünftigen CO₂-Systems

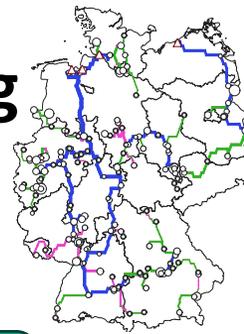
Methodik

- **CO₂-Quellen der Industrie und CO₂-Abscheidung**
 - Zement- und Kalkherstellung: prozessbedingte CO₂-Emissionen
 - Stahlwerke und Kraftwerke: Unklare Situation?
- **CO₂-Nutzung (CCU)**
 - Grundstoffchemie: CO₂-Bedarf für die Herstellung von Methanol
 - Methanol als Grundstoff für Kunststoffherstellung und Treibstoffe
- **Schließen des CO₂-Kreislaufs**
 - Müllverbrennung: langfristig absehbar hohe (fossile) CO₂-Emissionen
 - Anteil der Verbrennung durch Recycling verringern
- **CO₂-Import und Export**
 - Austausch mit Nachbarländern, gemeinsame Speichernutzung, Transit
- **CO₂-Hubs und CO₂-Speicherung**
 - Offshore, z.B. in der Nordsee



Systemisch konsistente Transformationsszenarien zur Topologieplanung

Methodik



Simulation Technologiediffusion



Optimierung Infrastruktur-Topologie

■ Szenarien Industrietransformation

- Langfristszenarien 3 zur Erreichung der Klimaziele [1]

■ Standortscharfe Auflösung

- Technologiedatenbank mit Industrieanlagen in Europa

■ Materialflussmodellierung

- u.a. Untersuchungen zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufs

■ Modellfamilie:



■ Optimierte Netztopologie

- Standortscharfe Auflösung (~6 km)
- Berücksichtigung von Landnutzungsfaktoren (z.B. Bevölkerungsdichte, Steigung, bestehende Pipelines)
- Dichte/flüssige Phase und gasförmiger Transport

■ Systemkosten

- Berechnung von Einbauten (z.B. Pumpen, Verflüssigern)
- Bestimmung von CAPEX, OPEX und Kosten je Tonne CO₂

[1] T. Fleiter et al., 2024 "Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - O45-Szenarien - Modul Industriesektor".

Schwer vermeidbare Emissionen aus Industrie und MVA

Daten und Prozesse

Verbleibende Emissionen nach umfassenden Minderungsmaßnahmen

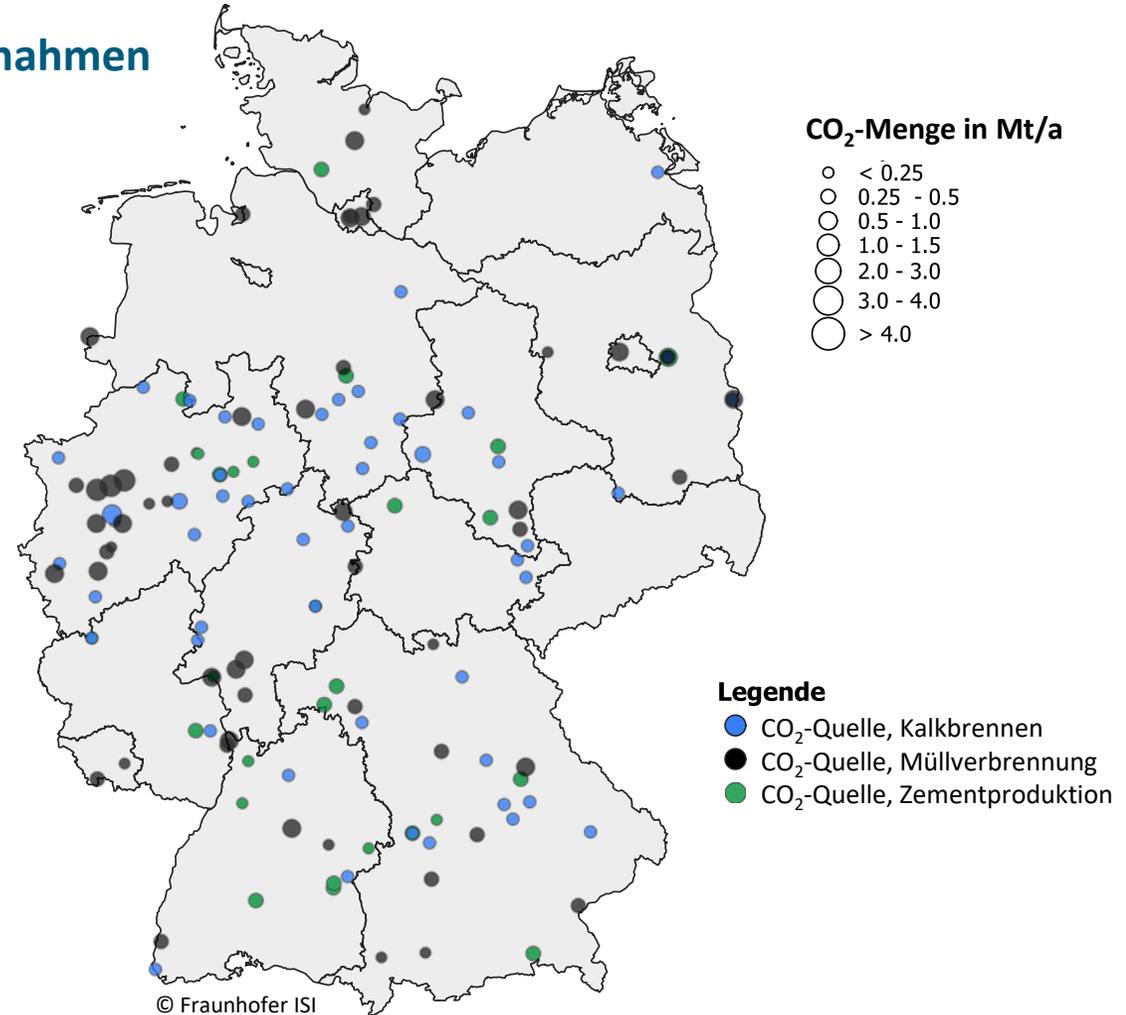
- CCS ermöglicht die weitgehende Abscheidung bei fehlenden Minderungsalternativen

Relevante Prozesse:

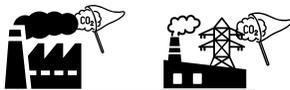
- Brennen von Kalk
- Brennen von Klinker (Zementherstellung)
- Müllverbrennung
- (Glasherstellung)

Räumliche Verteilung:

- Breite räumliche Verteilung der Standorte und Emissionen



2045



Kategorie	Kalk	Zement	WTE
Standorte	52	32	55
Menge [Mt/a]	~4	~9	~27

Berücksichtigung biogener Emissionen

Klimaneutrale Alternative oder Negativemissionen

Biogenes CO₂ als klimaneutrale Alternative bei starker Abhängigkeit von Kohlenwasserstoffen

- Feedstock für Chemikalien
- Treibstoffe im Flugverkehr

Klimaneutralitätsziele bedürfen Einsatz von Negativemissionen¹

- Nutzung geologischer Speicher erfordern CO₂-Transport

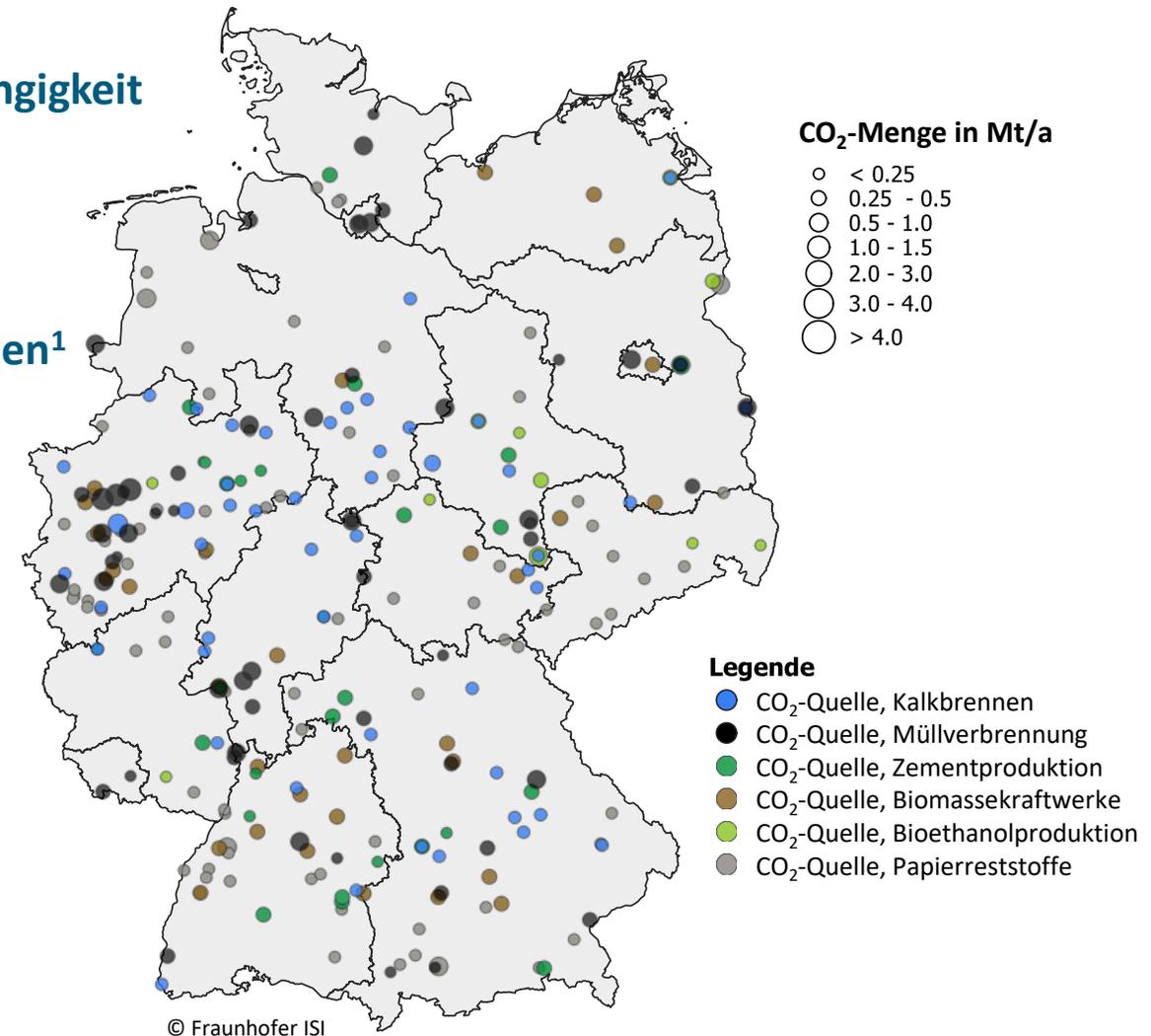
Relevante biogene Quellen

- Biomassekraftwerke (evtl. Zubau)
- Biogas, Bioethanol Herstellung
- Energetische Nutzung von Reststoffen in der Papierindustrie

2045



Kategorie ¹	Kalk	Zement	WTE	Bio Power >10kt/a	BECCS Paper	Bio Ethanol
Standorte	52	32	55	37	91	11
Menge [Mt/a]	~4	~9	~27	~2.5	~10.2	~5.7



¹ Direct Air Capture (DAC) nicht betrachtet, da DE nicht über ausreichend Energieüberschuss verfügt

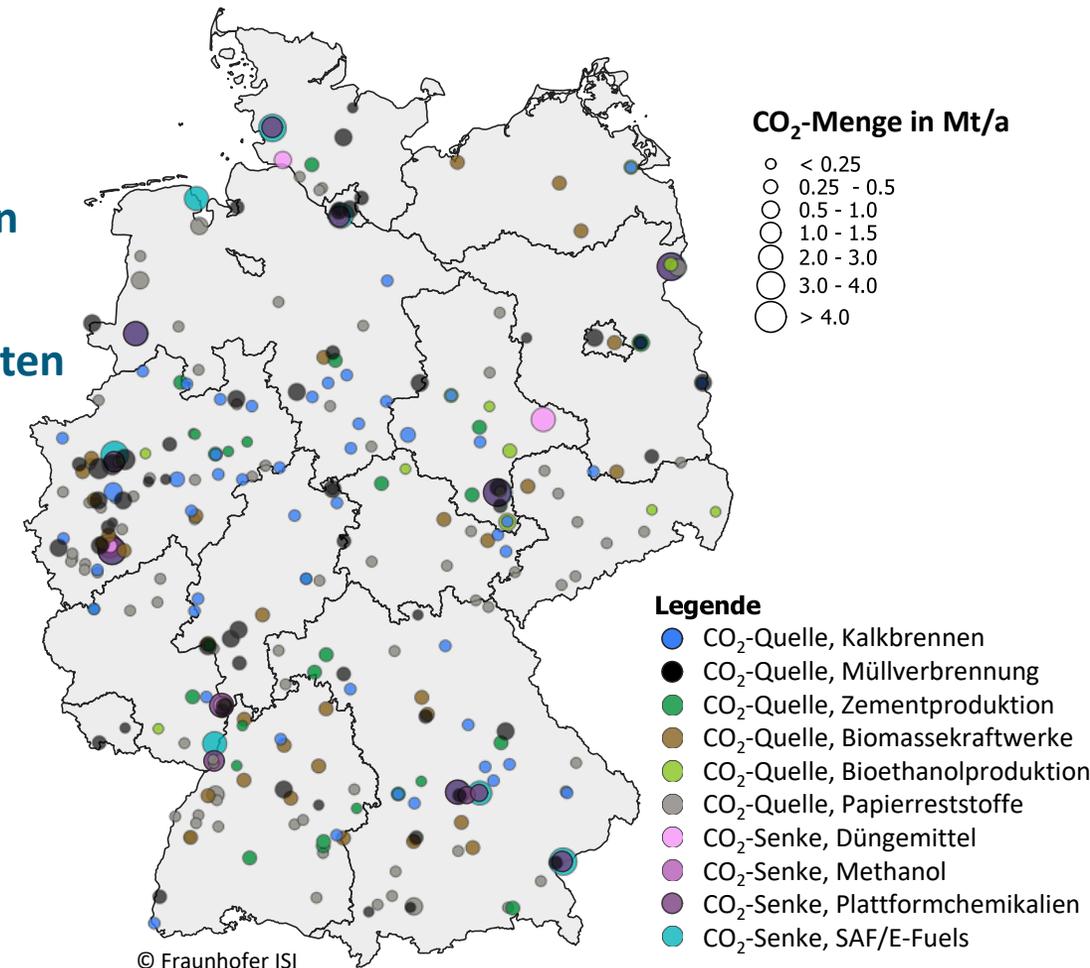
CO₂ als Rohstoff in der (Petro-)Chemie

Einbindung von CO₂ in der Chemieindustrie und Treibstoffproduktion

- **CO₂ wird zum Rohstoff für Chemie und E-Fuels (bis 60 Mt/a in DE)**
 - Anbindung von Chemie und Raffinerie Clustern nötig
 - Berücksichtigung aktueller und geplanter Projekte
- **Hoher Energiebedarf bei der Herstellung von Kohlenwasserstoffen**
 - Schließen des Kohlenstoffkreislaufs notwendig
- **Regulatorik als zentrale Baustein zur Beseitigung von Unsicherheiten**
 - Gegenseitige Abhängigkeiten von mehreren Branchen
 - Räumliche Verlagerungen denkbar
- **Berücksichtigung des Gesamtsystems**
 - Technologiewahl mit großem Einfluss auf CO₂-Netz

2045

Kategorie	Kalk	Zement	WTE	Bio Power >10kt/a	BECCS Paper	Bio Ethanol	CCU Chem	CCU Fuels
Standorte	52	32	55	37	91	11	17	13
Menge [Mt/a]	~4	~9	~27	~2.5	~10.2	~5.7	~30	~32



Speicher und Grenzübergangspunkte komplettieren das System

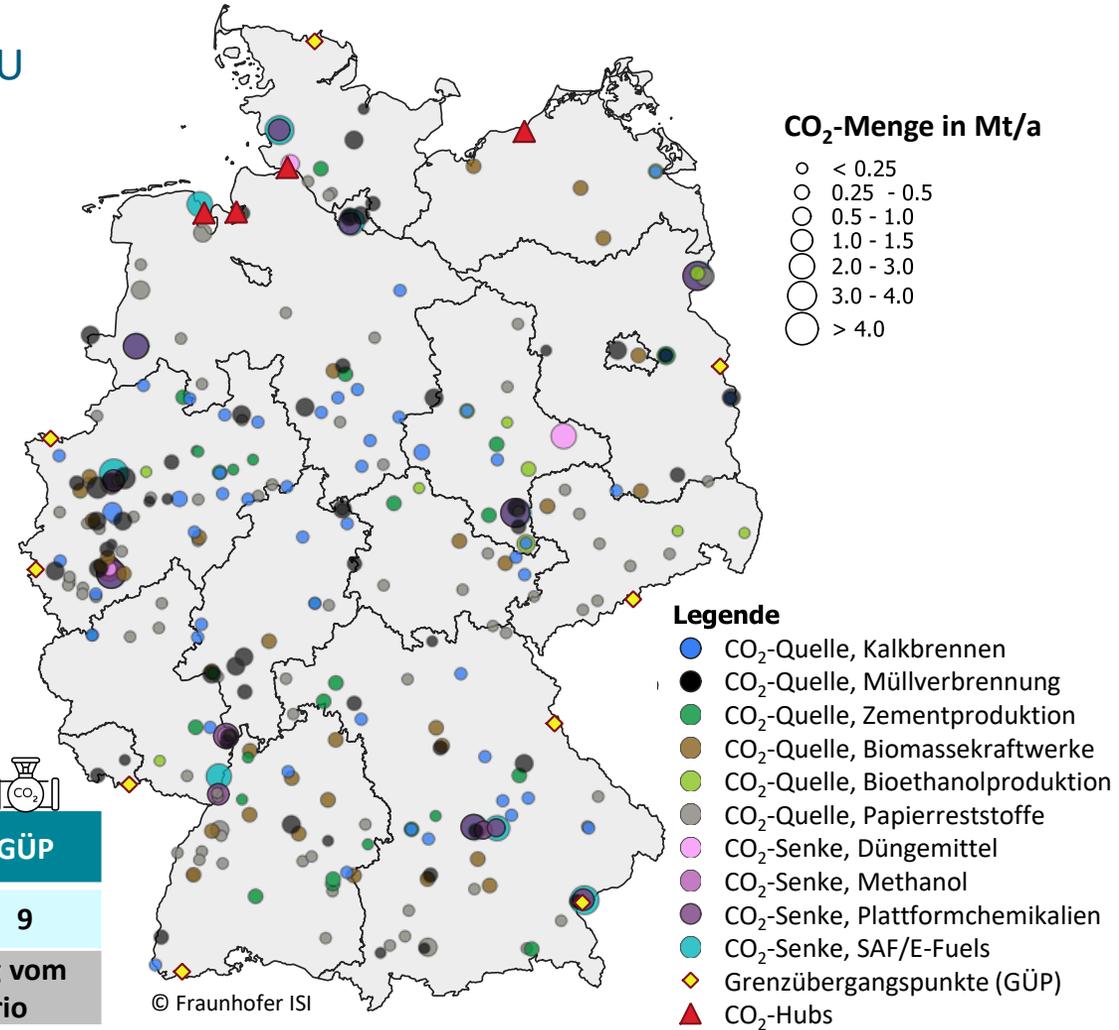
Importe und Exporte führen zu Transit und Speicherbedarf

Speicheranschluss: 41 MtCO₂/a in 23 Projekten bis 2030 in der EU

- Berücksichtigung von Offshore-Speichern
 - Zunächst Anbindung über Schiffe ausgehend von CO₂-Hubs
 - Direkter Pipelineanschluss im späteren Hochlauf
- Keine Berücksichtigung von Onshore-Speichern
 - Geringe Akzeptanz, Benötigung für H₂?

Grenzübergänge (GÜP):

- Deutschland fungiert als Transitland (Niederlande, Nordsee)
 - CO₂ Speicher überwiegend in der Nordsee
- GÜP zu Nachbarländern basierend auf heutigem Gasnetz



2045

Kategorie	Kalk	Zement	WTE
Standorte	52	32	55
Menge [Mt/a]	~4	~9	~27

zunächst
ausgeklammert

CCU Chem	CCU Fuels	CO ₂ Hubs	GÜP
17	13	3	9
~30	~32	Abhängig vom Szenario	

CO₂: Senken, Quellen und ein mögliches Transportnetz

Illustration einer möglichen Topologie zur Abschätzung des Pipelinebedarfs

■ Anwendung: Kombinierte CCUS-Strategie mit klarem Fokus

- CO₂-Abscheidung mit möglichst hoher Anschlussrate
 - Zement- und Kalkwerke, sowie Müllverbrennung
- CO₂-Nutzung in der Chemie sowie Speicherung offshore
- Keine Berücksichtigung von Kraftwerken, explizit biogenen Quellen, weiteren Industrien, DAC oder onshore Speichern

■ Aufbau eines CO₂-Transportnetzes

- ~ 7.000 km Gesamtlänge

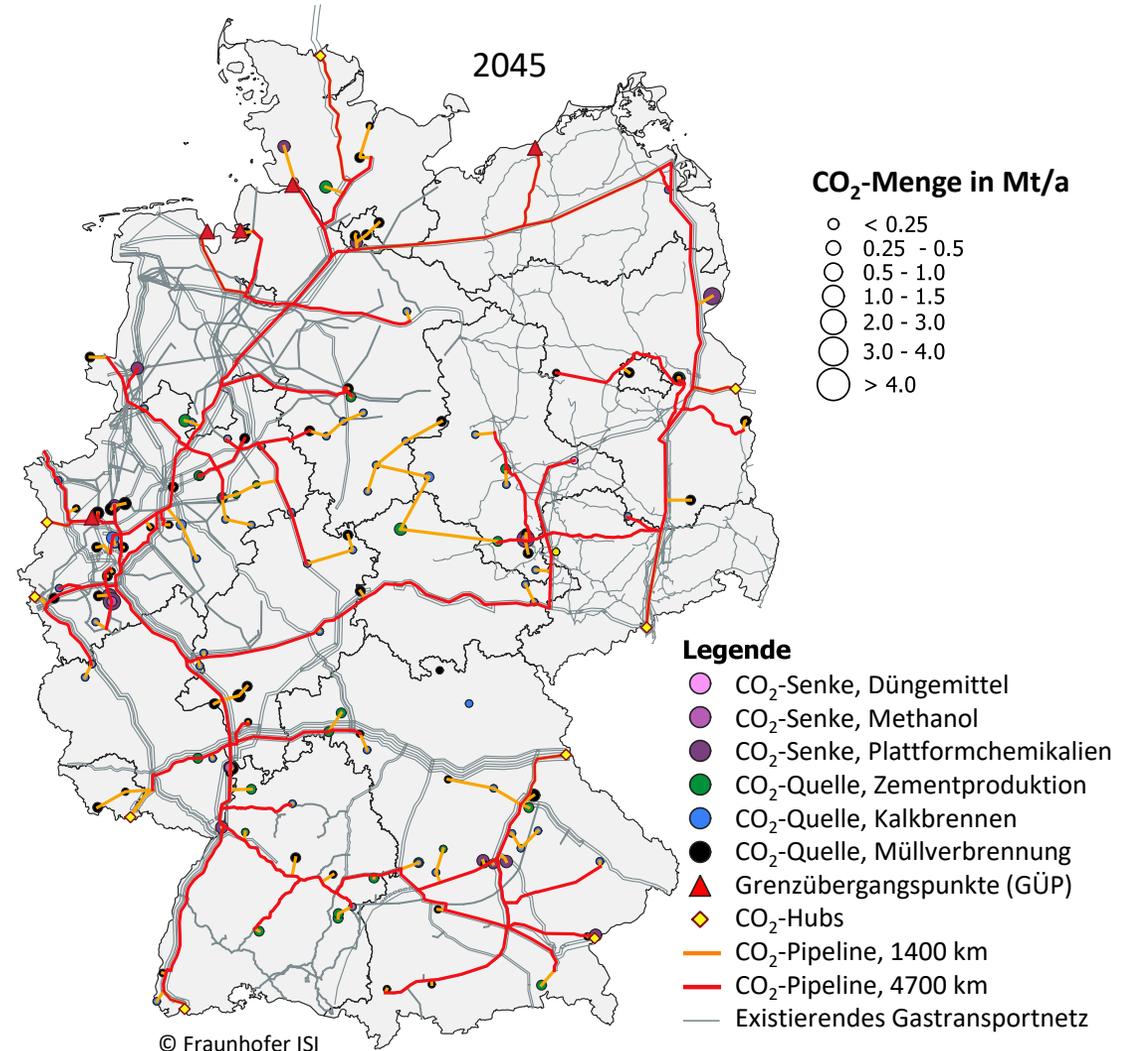
■ Verwendung bestehender Pipelinetrassen

- Kosten- und Zeiteffizient durch klare Landnutzungsverhältnisse
- Vollständiger Neubau für den Transport in der Flüssigphase



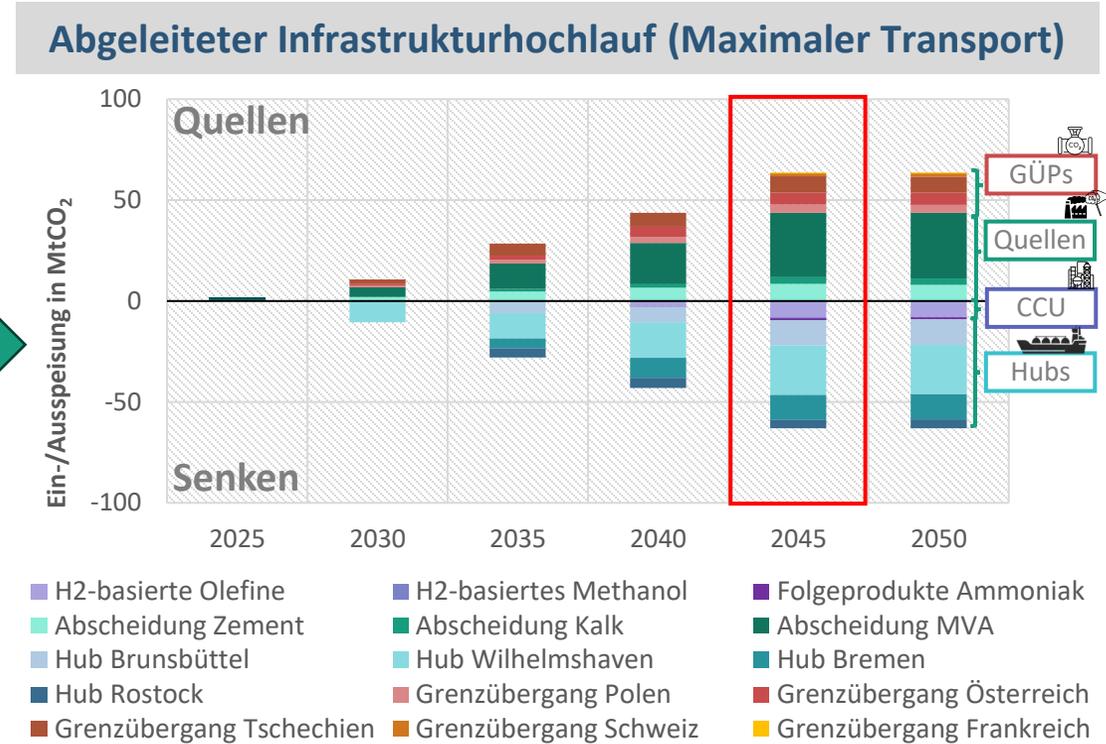
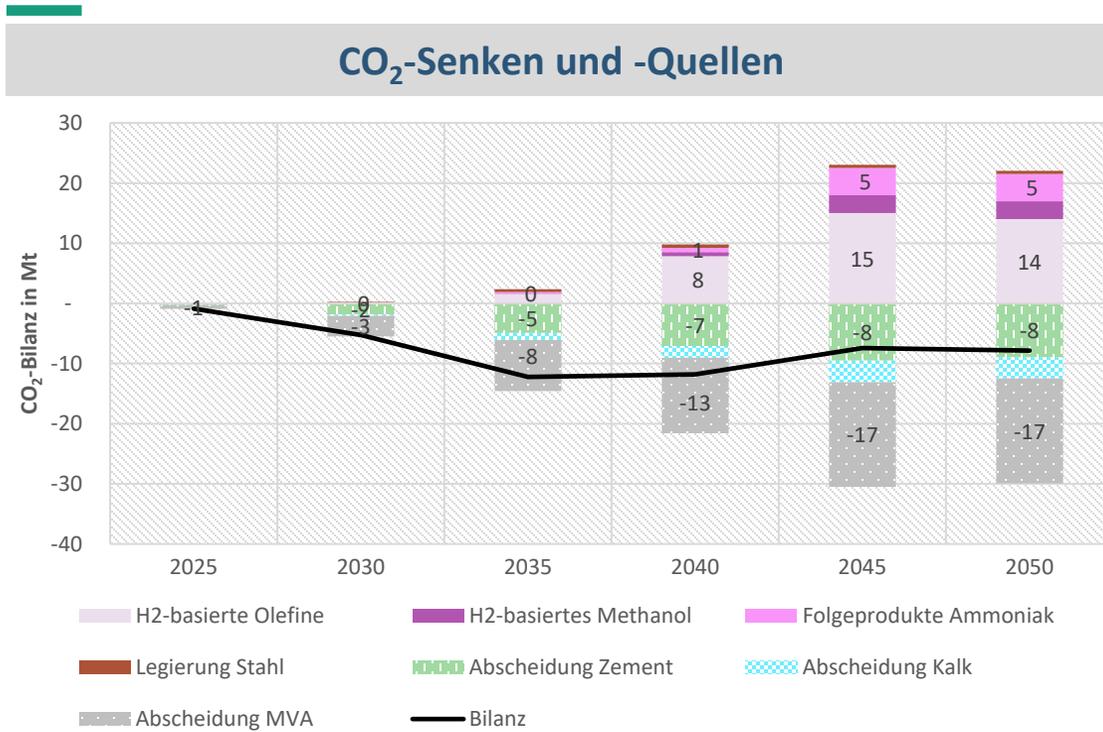
Strömungstechnische Auslegung durch Fraunhofer SCAI mit:

MYNTS 



Konsistentes Transformationsszenario als Basis für Mengengerüst und Hochlauf

Priorität bei schwer vermeidbaren Emissionen und CCU in der Chemieindustrie



- **Konsistentes Transformationsszenario der Langfristszenarien III**
 - Getrieben von Transformation der Chemieindustrie zu CCU
- **Keine Berücksichtigung von Nachbarländern und Speicherbedarfen**

- **Annahmen zum Transittransport sowie der Speicheranbindung über Hubs**
- **Entkopplung des CCU-Bedarfs von Abscheidemengen**

Vier Szenarien zur Berücksichtigung äußerer Einflüsse

Abgeleitet aus den Langfristszenarien III¹

Annahmen zur Szenarioentwicklung:

- Speicher in der Nordsee und der Export zur Speicherung²
- Import/ Export bzw. Transit beruht auf Annahmen
 - Europäischer CO₂ Transport lässt sich schwer abschätzen
- Unsicherheiten teilweise schwer zu berücksichtigen
 - z.B. Abwanderung Chemieindustrie, steigern der Recyclingquote...

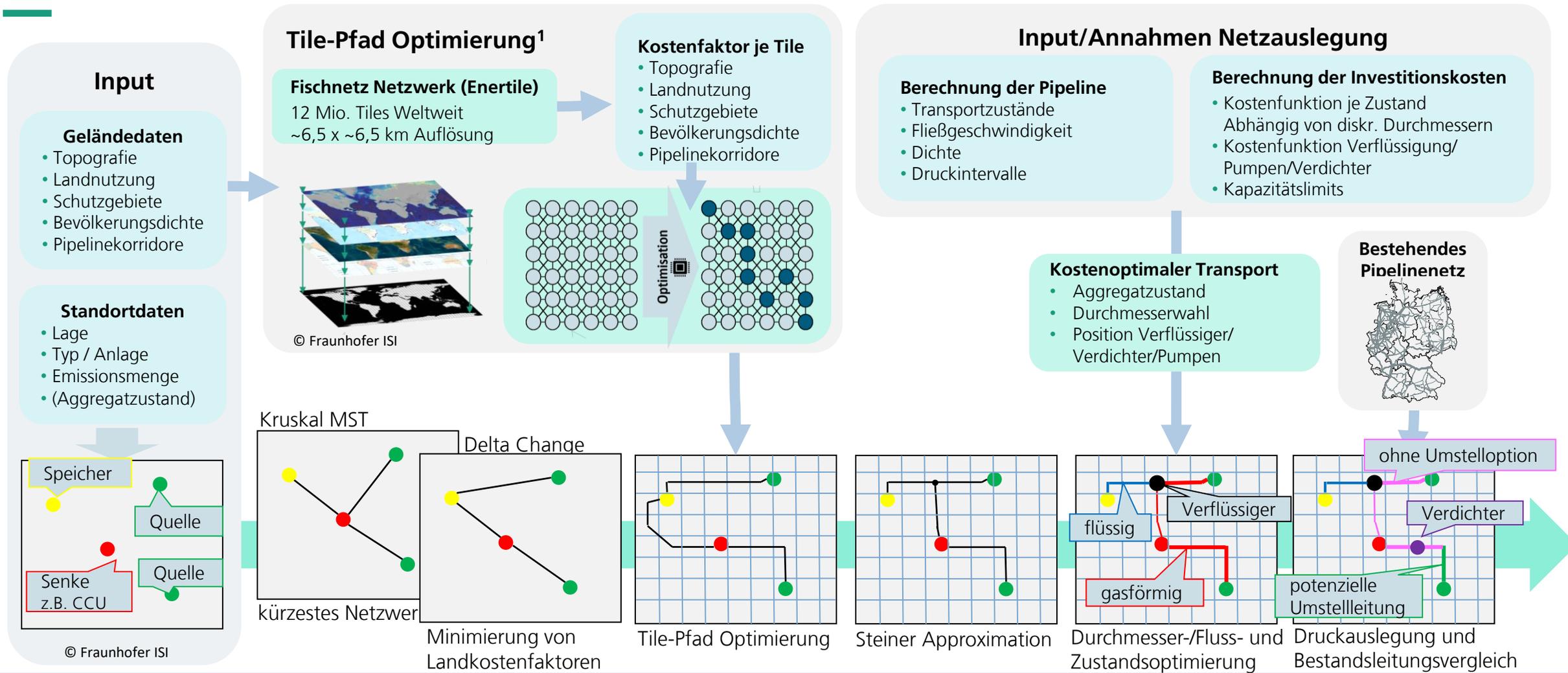
	Szenario	Quellen				Senken	
		Industrie	WtE	Biogen	Import	CCU	Export
1	Standard (O45-H2)	13 Mt/a Zement, Kalk	27 Mt/a	–	–	23 Mt/a	–
2	Transit Fokus	13 Mt/a Zement, Kalk	27 Mt/a	–	20 Mt/a	–	10 Mt/a
3	Max Transport	13 Mt/a Zement, Kalk	32 Mt/a	–	20 Mt/a	–	–
4	CCU Fokus	13 Mt/a Zement, Kalk	27 Mt/a	11 Mt/a	9 Mt/a	60 Mt/a	–

CCU: Carbon Capture and Utilization;
 WtE: Müllverbrennung;
 Import/Export Werte für 2050;

[1] T. Fleiter et al., 2024 "Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - O45-Szenarien - Modul Industriesektor".
 [2] Carbon Management Strategie des Bundes: Kabinettsbeschluss Bundesregierung 2024 Drs. 20/5145

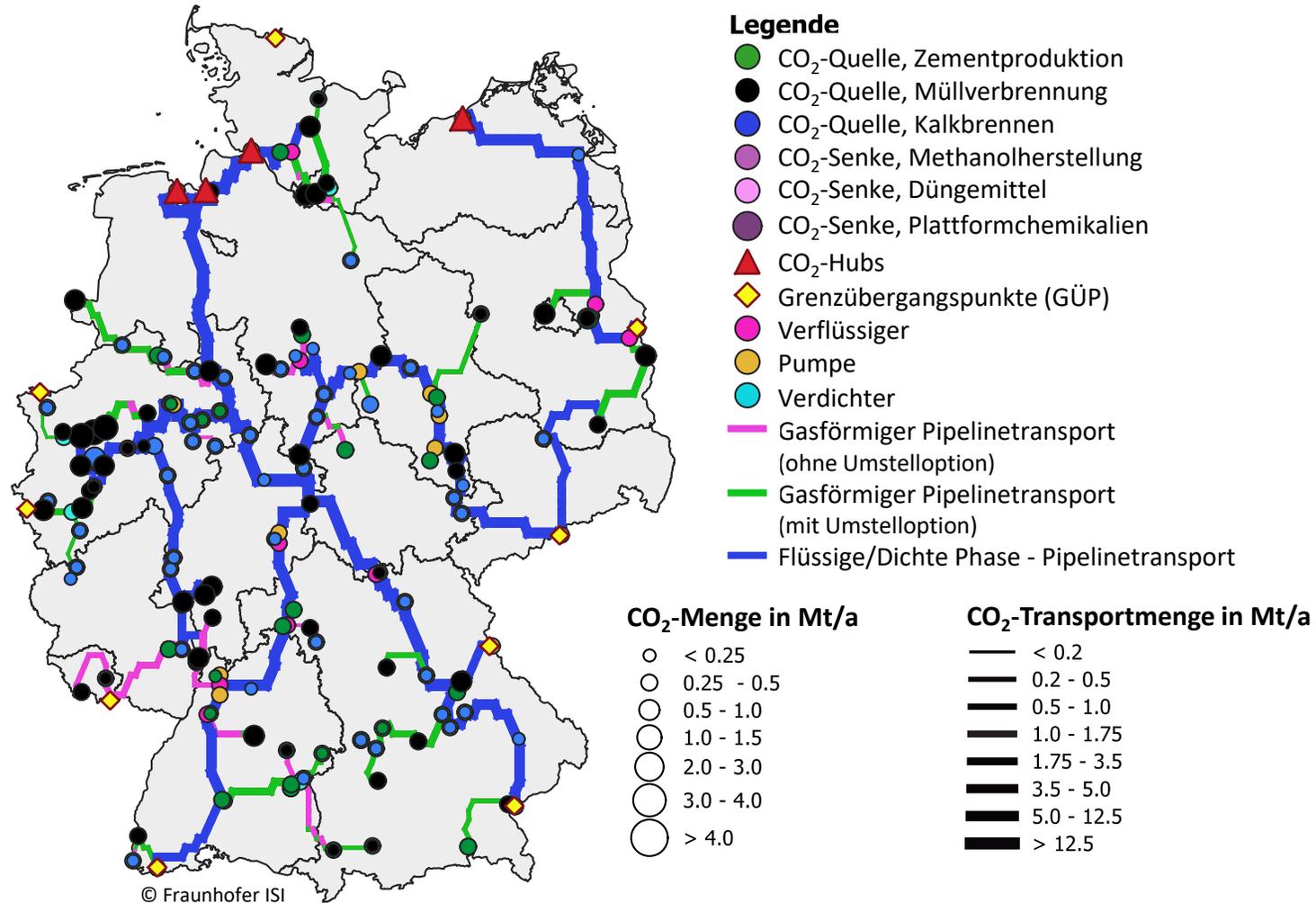
Optimierung von Pipeline-Topologien - Methodik

[1] Karkossa, GIS-basierte Modellierung zur optimierten Routenführung (trans)nationaler Wasserstoffpipelines, 2023



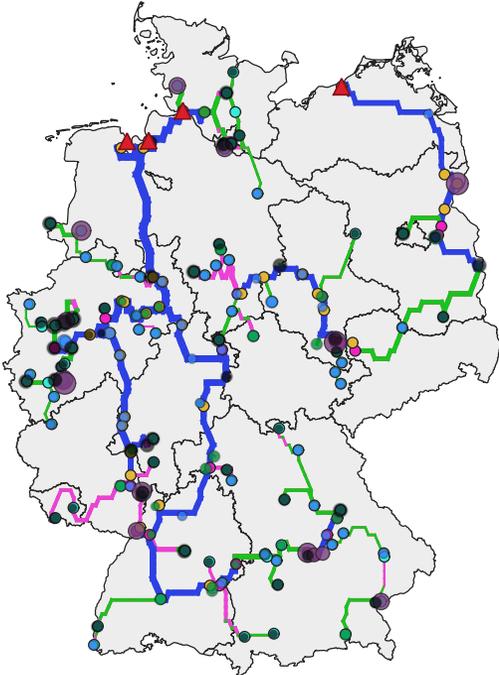
Optimierung von Pipeline-Topologien - Ergebnisse

Szenario 3 Max Transport

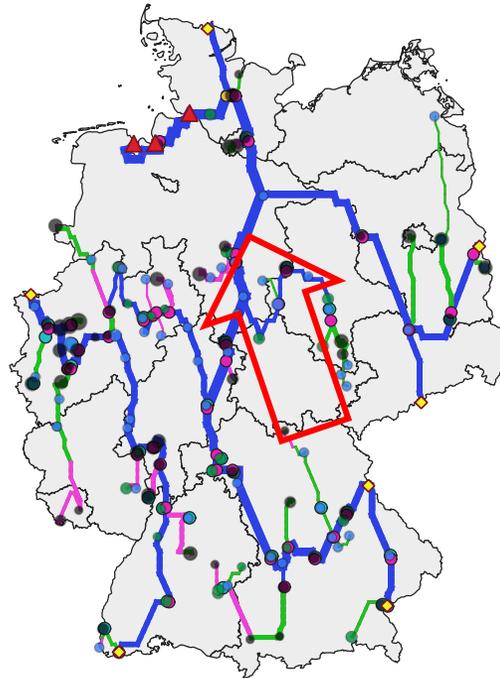


Optimierung von Pipeline-Topologien - Ergebnisse

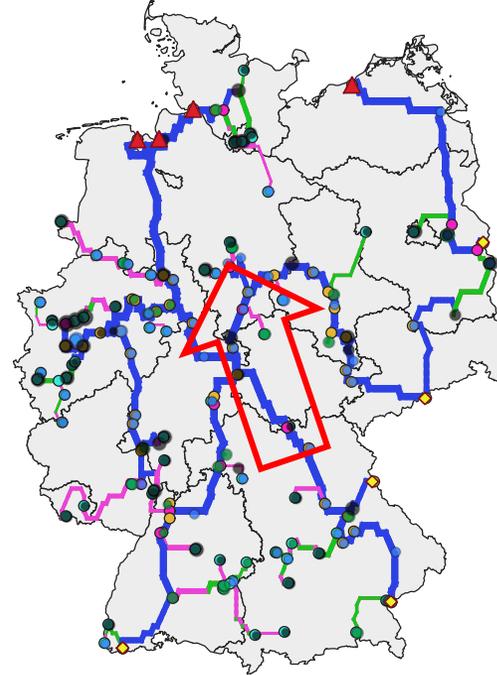
Szenario 1 Hard to Abate + CCU



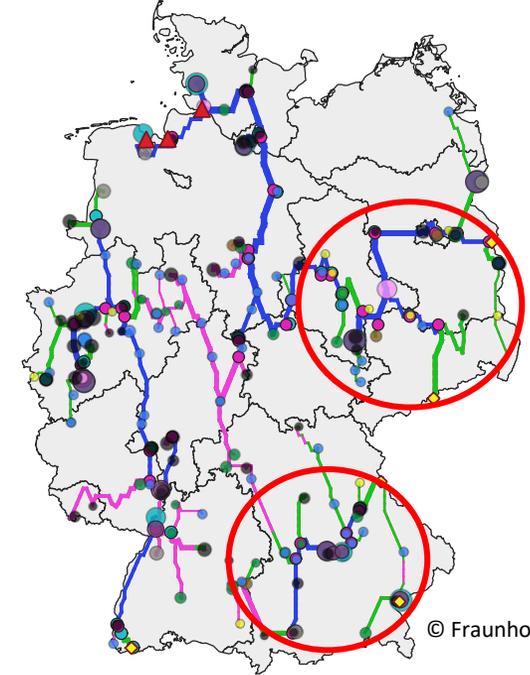
Szenario 2 Transit-Fokus



Szenario 3 Max Transport



Szenario 4 CCU-Fokus



CO2-Abscheidemenge in Mt/a

- < 0.25
- 0.25 - 0.5
- 0.5 - 1.0
- 1.0 - 1.5
- 2.0 - 3.0
- 3.0 - 4.0
- > 4.0

CO2-Transportmenge in Mt/a

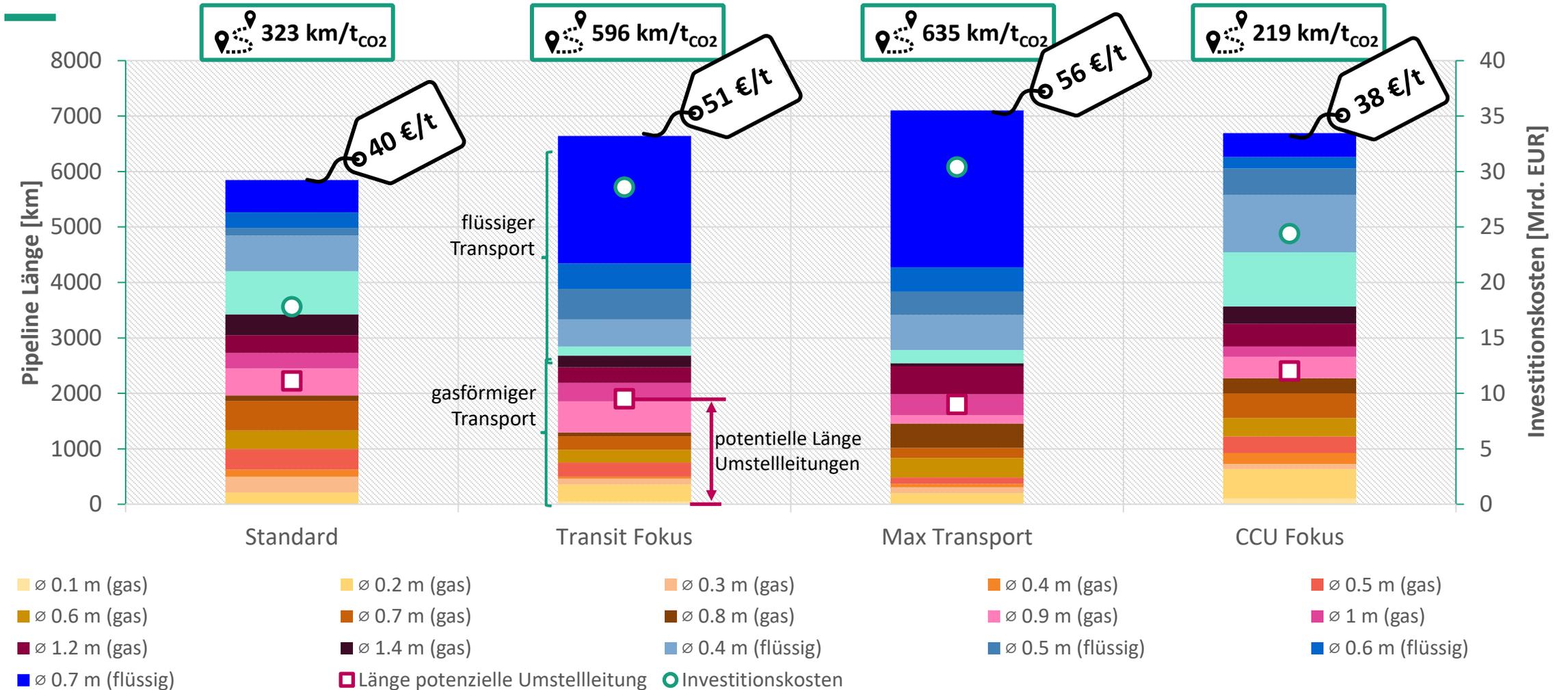
- < 0.2
- 0.2 - 0.5
- 0.5 - 1.0
- 1.0 - 1.75
- 1.75 - 3.5
- 3.5 - 5.0
- 5.0 - 12.5
- > 12.5

Legende

- CO2-Quelle Zement
- CO2-Quelle Müllverbrennung
- CO2-Quelle Kalk brennen
- CO2-Quelle Biomasse Kraftwerke
- CO2-Quelle Bioreststoffe Papierindustrie
- CO2-Quelle Bio Ethanol Herstellung
- CO2-Senke Methanol
- CO2-Senke Ammoniak Produkte
- CO2-Senke Olefine
- CO2-Senke E-fuels
- ▲ CO2 Hubs
- ◆ Grenzübergangspunkte
- Verflüssiger
- Pumpe
- Verdichter
- Gasförmiger Transport (ohne Umstelloption)
- Gasförmiger Transport (mit pot. umstelloption)
- Flüssiger/Dichte Phase Transport

© Fraunhofer ISI

Optimierung von Pipeline-Topologien - Ergebnisse



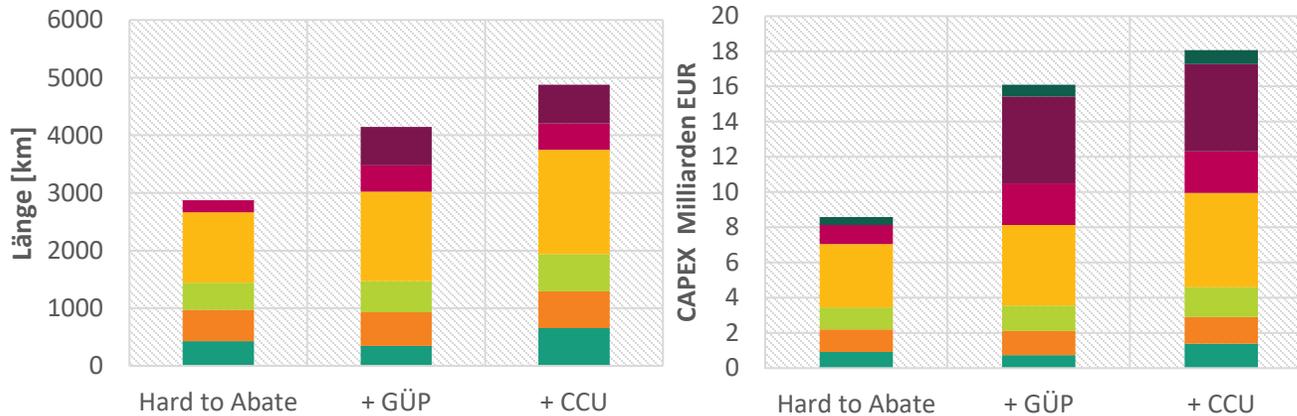
Mögliches „Low Regret Network“

Für „Hard to Abate Emission“

Flüssiges Transportnetzwerk als Infrastrukturgrundlage

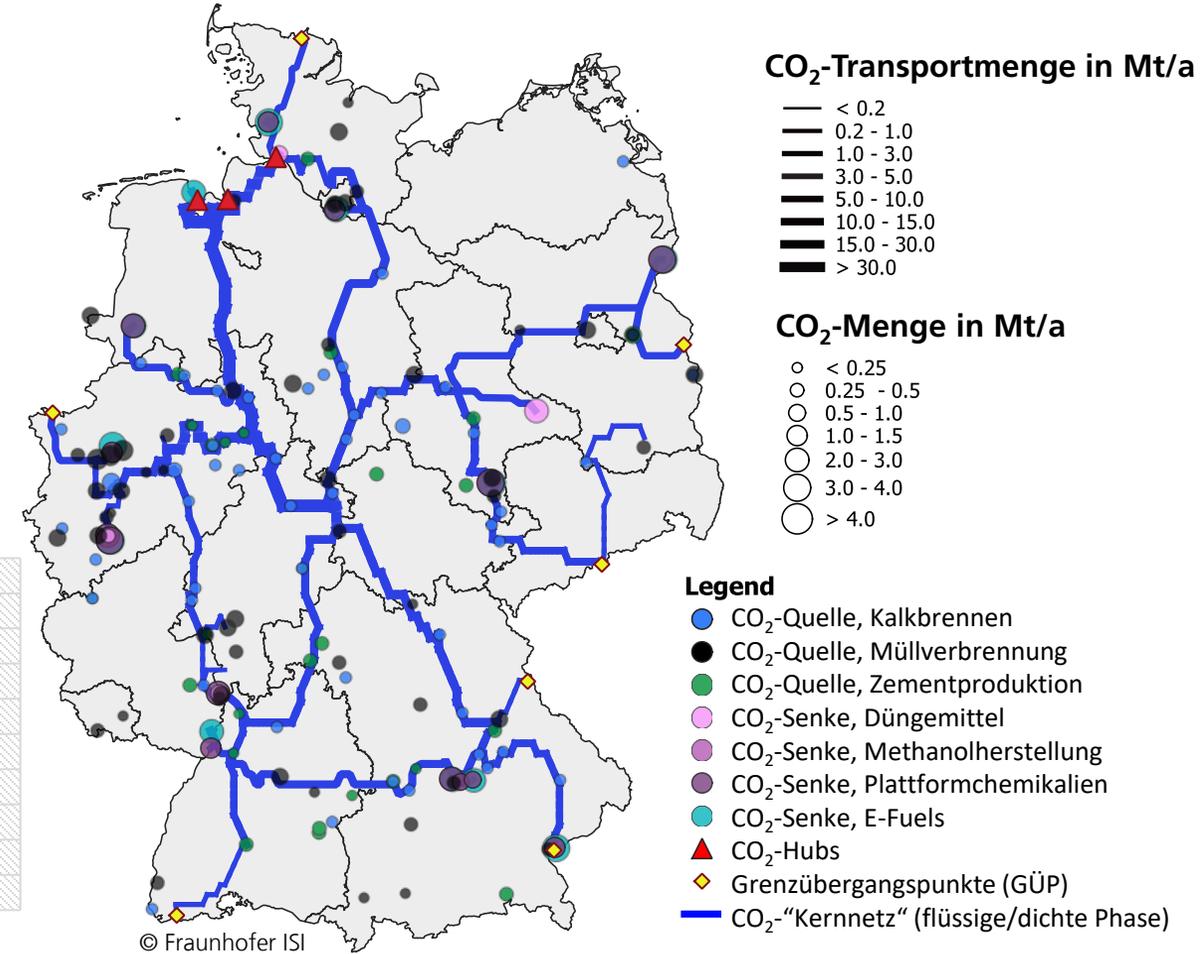
- Netzkapazitätsauslastung max 70% (Erweiterung möglich)
- Gute Abdeckung von Industriestandorten und Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte
- Inklusive Alternativrouten (nicht vollständig ausfallsicher)

Entscheidende Weichen :
Wird CCU in großem Maßstab zum Einsatz kommen?
Wird es zu hohem Transittransport kommen?



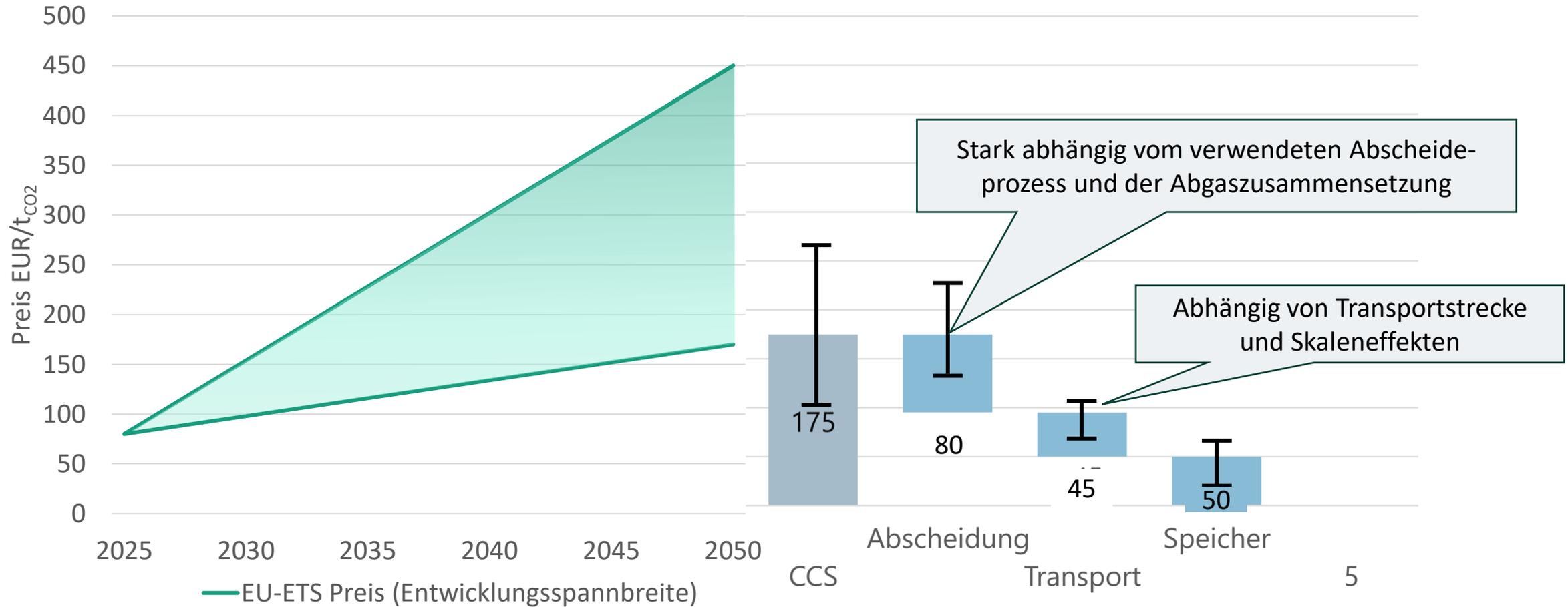
■ Ø0,4
 ■ Ø0,5
 ■ Ø0,6
 ■ Ø0,7
 ■ 2xØ0,7
 ■ 3xØ0,7
 ■ Weiteres Invest (Pumpen)

Kategorie	Kalk	Zement	WTE	CCU Chem	CCU Fuels	CO ₂ Hubs	GÜP
Standorte	52	32	55	17	13	3	7
Menge Mt/a	44			62		44	30



Warum CCU/S-Technologien wirtschaftlich sein können

Kostenvergleich CCS vs. EU-ETS Zertifikatspreis



CO₂: Senken, Quellen und ein mögliches Transportnetz

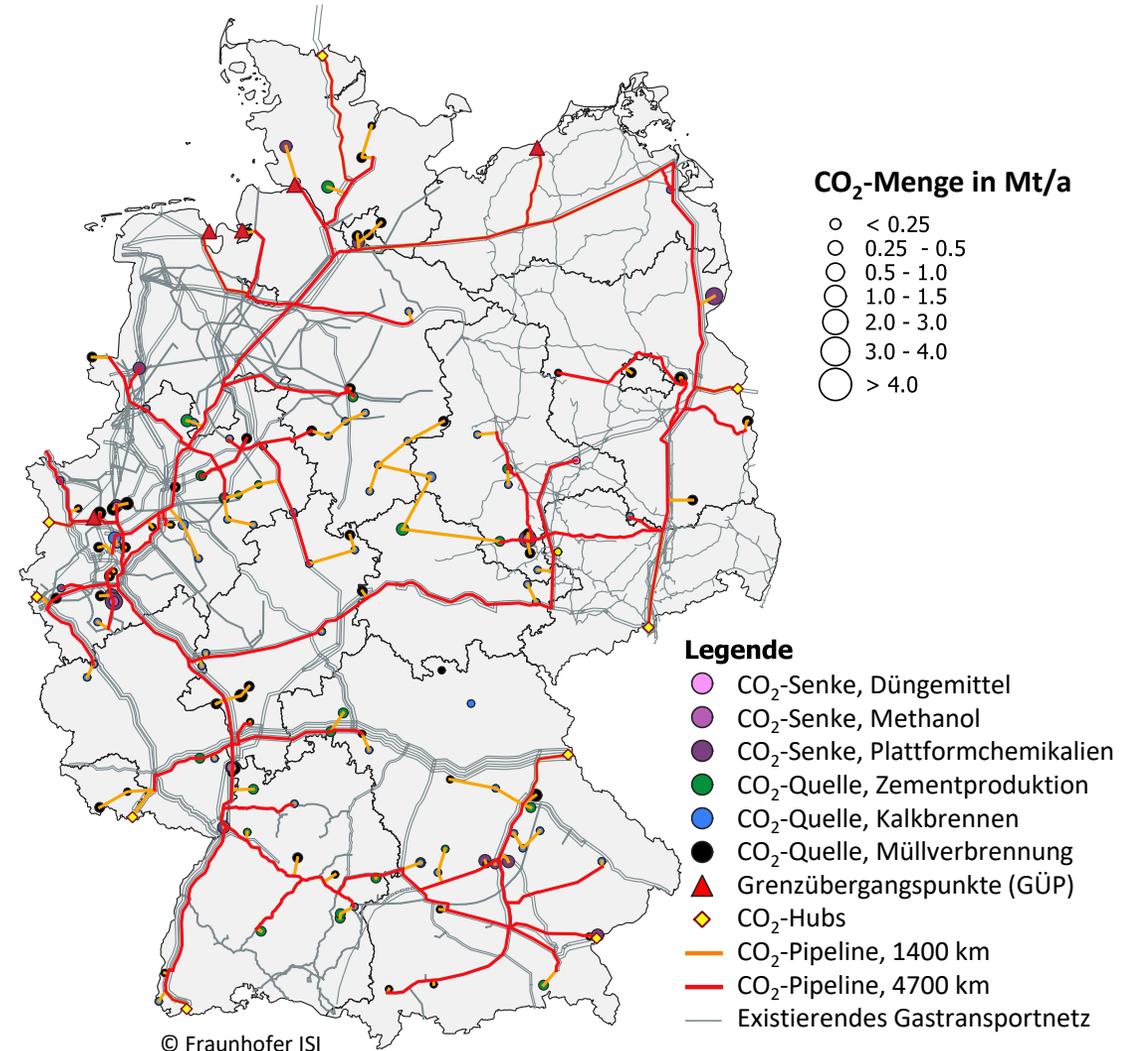
Illustration einer möglichen Topologie zur Abschätzung des Pipelinebedarfs

- **Kombinierte CCUS-Strategie:**
 - CO₂-Abscheidung bei Zement- und Kalkwerken sowie Müllverbrennung
 - CO₂-Nutzung in der Chemie sowie Speicherung offshore
- **Aufbau eines CO₂-Transportnetzes**
 - ~ 7.000 km Gesamtlänge
- **Verwendung bestehender Pipelinetrassen**
 - Kosten- und Zeiteffizient durch klare Landnutzungsverhältnisse
 - Vollständiger Neubau für den Transport in der Flüssigphase



Strömungstechnische Auslegung durch Fraunhofer SCAI mit:

MYNTS 



05. Juni 2025 / Webinar / Fraunhofer CINES

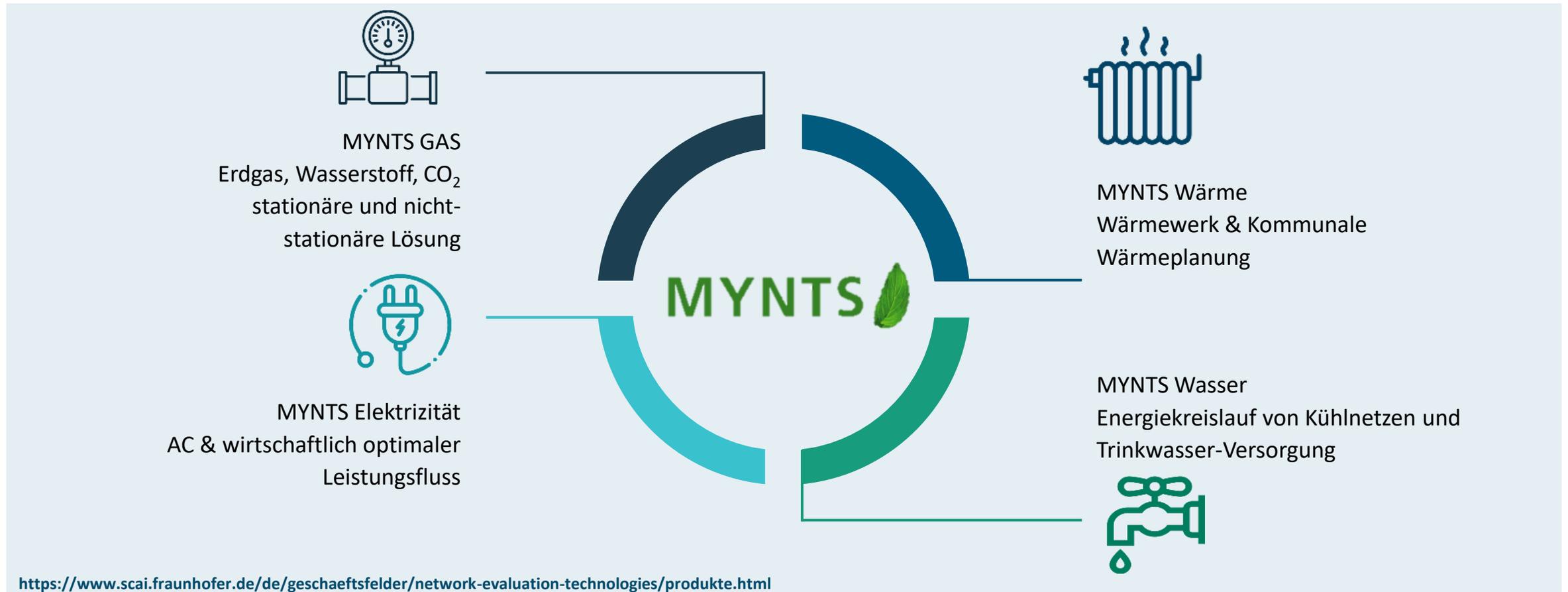
Simulation und Optimierung der zukünftigen CO₂-Transportnetze mit MYNTS

Dr. Mehrnaz Anvari, Finn Pittermann, Dr. Bernhard Klaassen

Fraunhofer SCAI

MYNTS (Multiphysikalischer Netzwerksimulator)

Flexible Planung, Simulation und Optimierung von Gas-, Strom-, Wärme- und Wassernetzen, **sowie Sektorenkopplung**

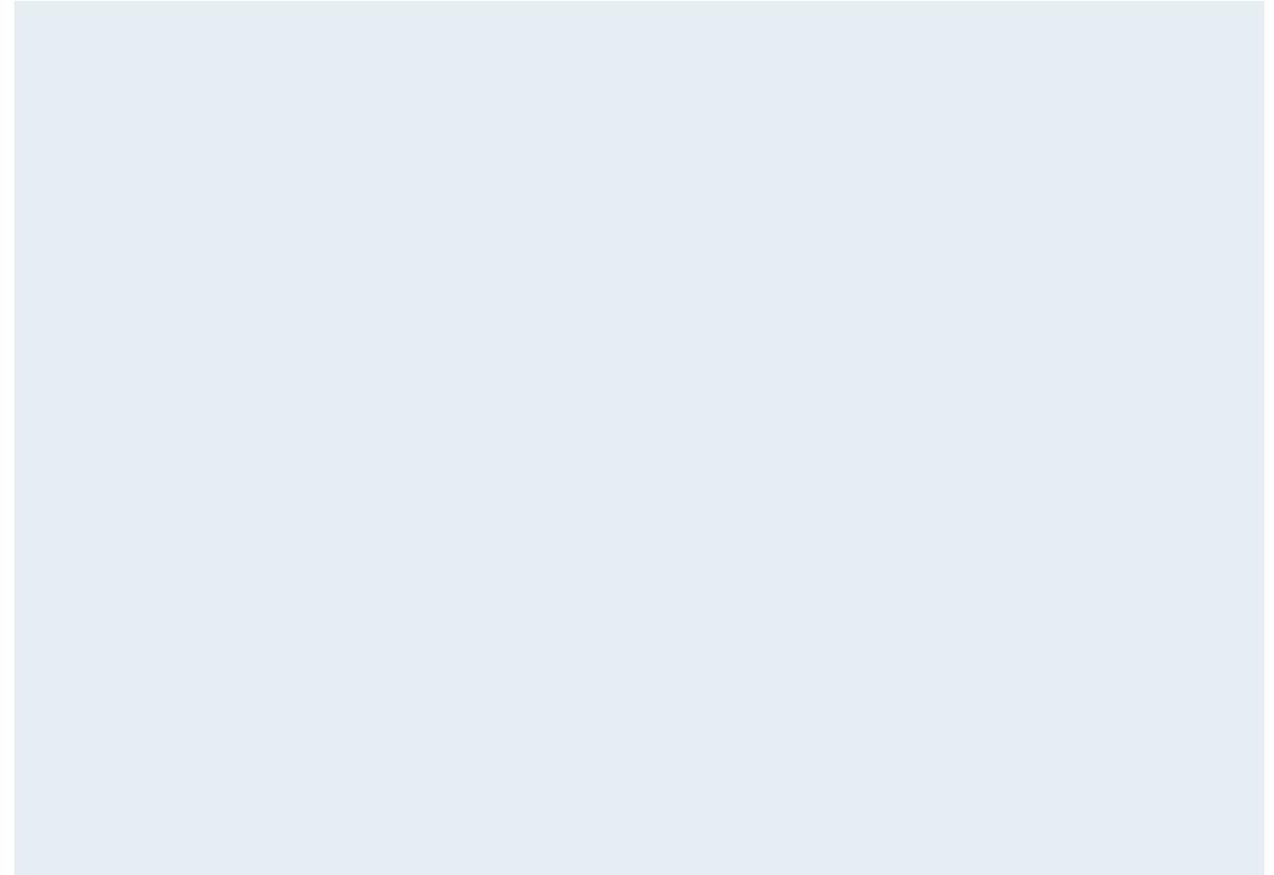
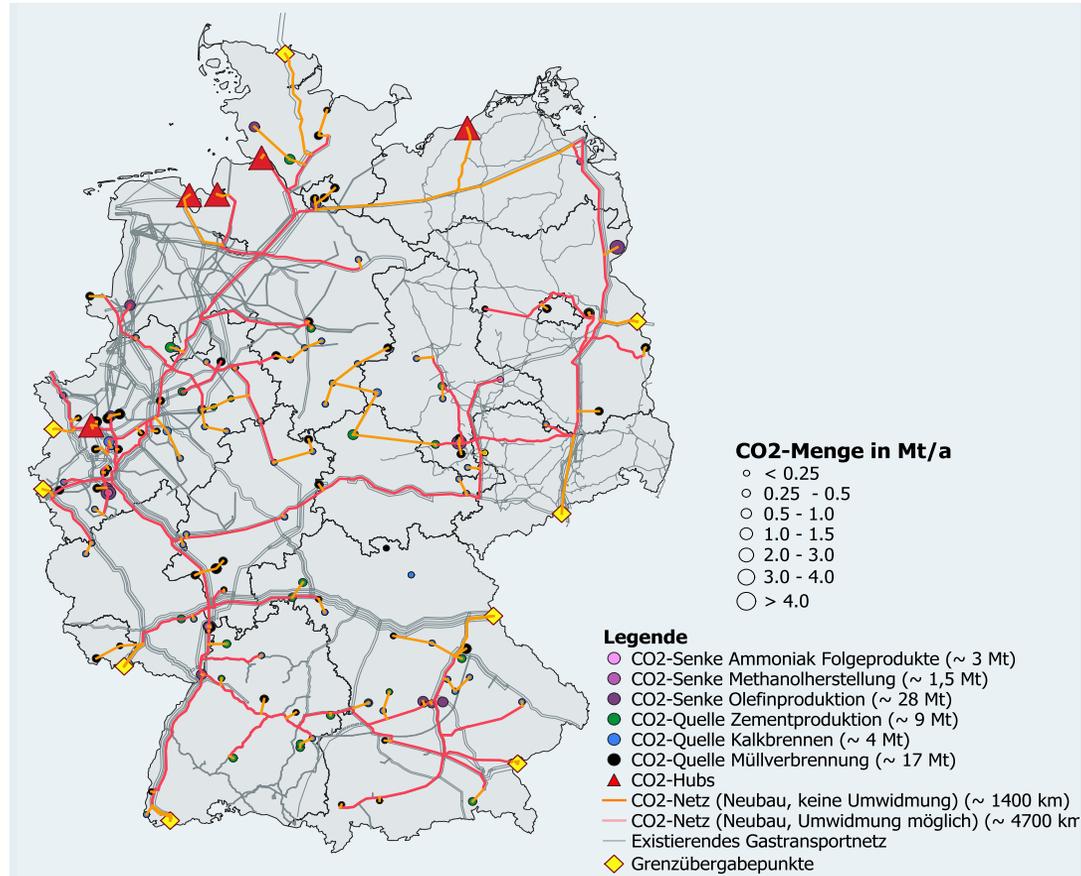


CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Importieren der Topologie



Quelle: Fraunhofer ISI

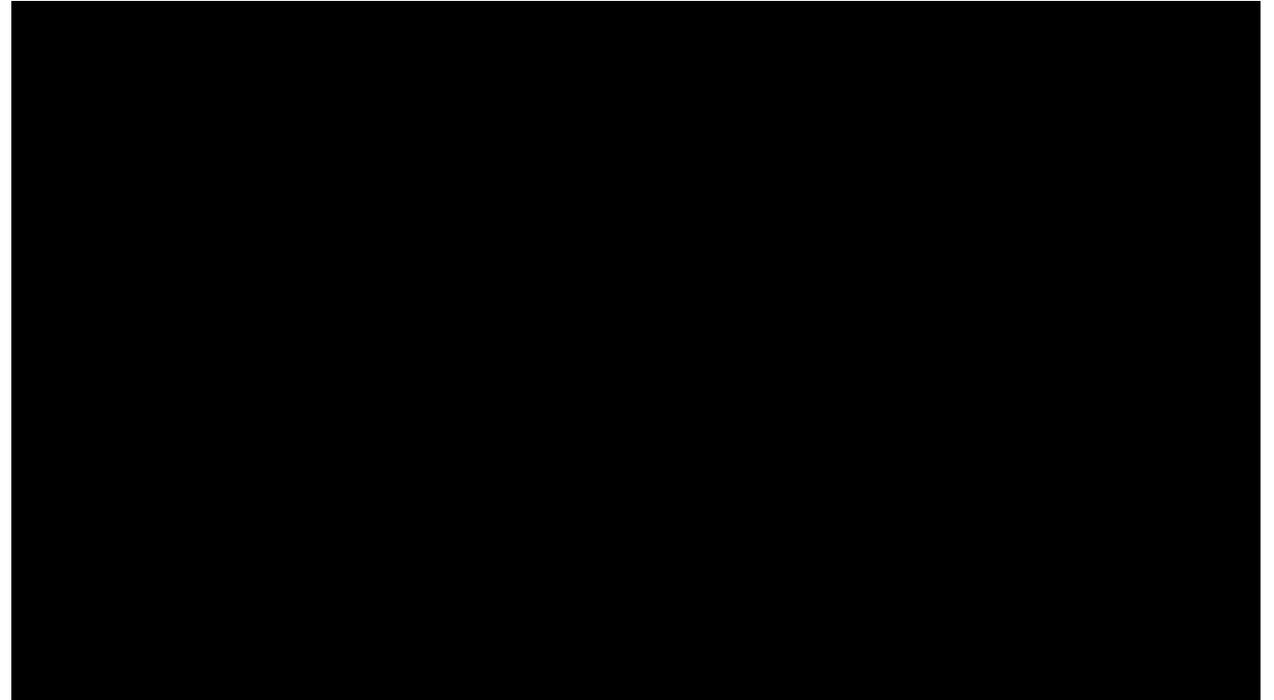
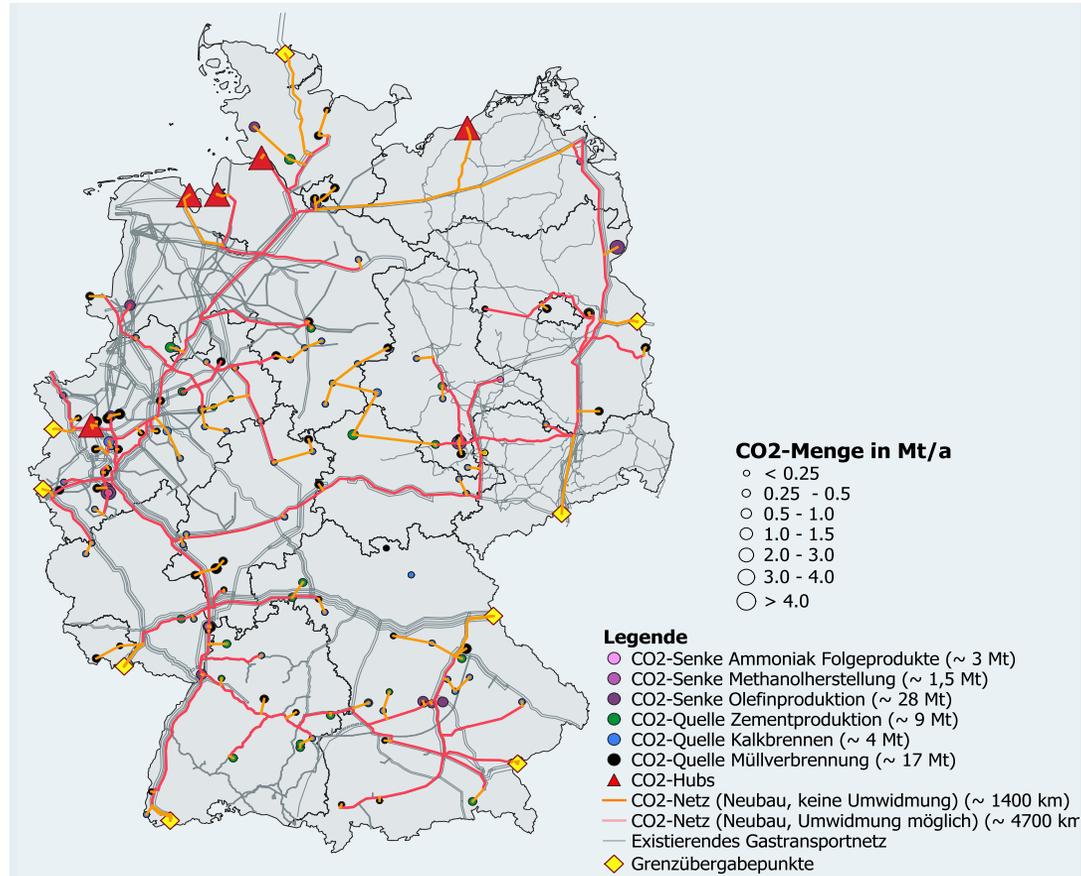


CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Importieren der Topologie



Quelle: Fraunhofer ISI



CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Szenarien importieren

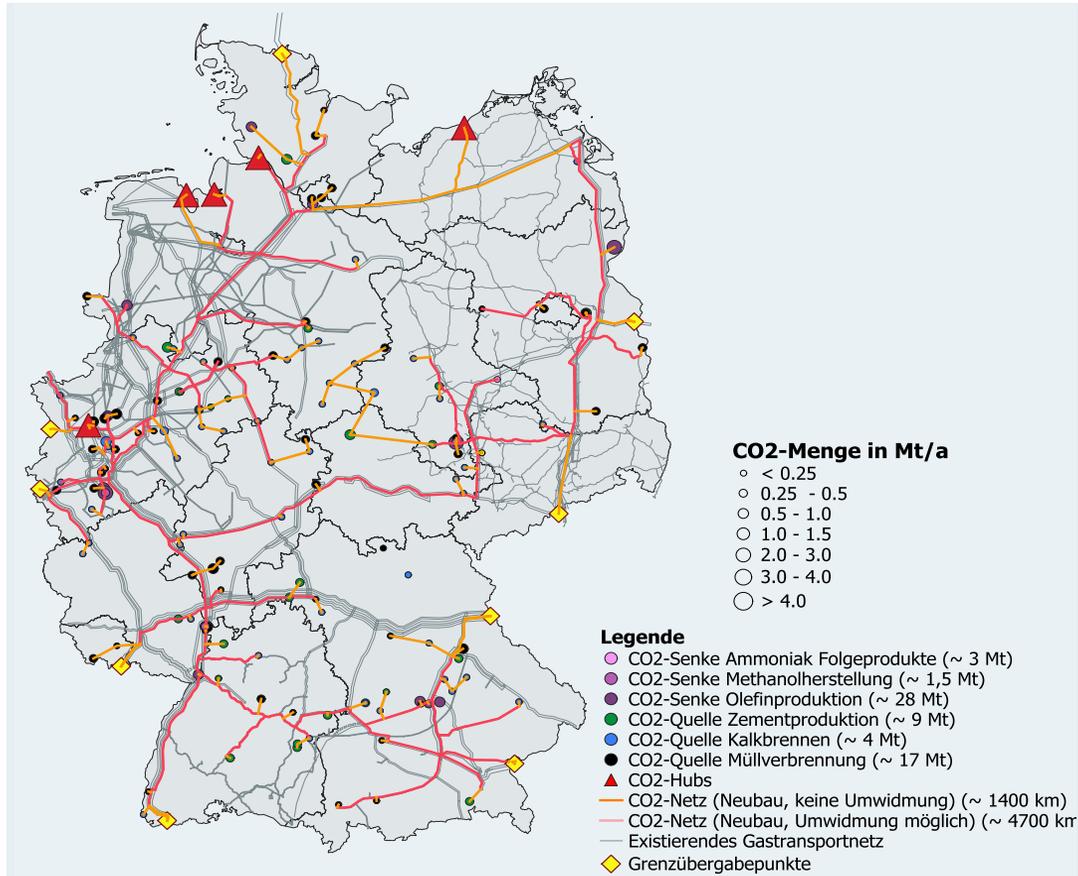


Import/Export Werte für 2045

*CCU: Carbon Capture and Utilization

**WtE: Müllverbrennung

Quelle: Fraunhofer ISI



	Szenario Name	Basis	Import	Export	CCU*	WtE**
1	Standard	O45-E	–	–	✓	✓
2	Transit/Import Fokus	O45-H2	12 Mt/a	–	✓	✓
3	Max Transport	O45-H2 40 Mt/a	20 Mt/a	–	–	✓ +20%
4	Export Fokus	O45-E	–	8 Mt/a	✓	✓
5	Begrenzter Transit + CCU	O45-H2	12 Mt/a	6 Mt/a	✓	✓
6	Begrenzter Transit	O45-H2	12 Mt/a	6 Mt/a	–	✓

CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Szenarien importieren

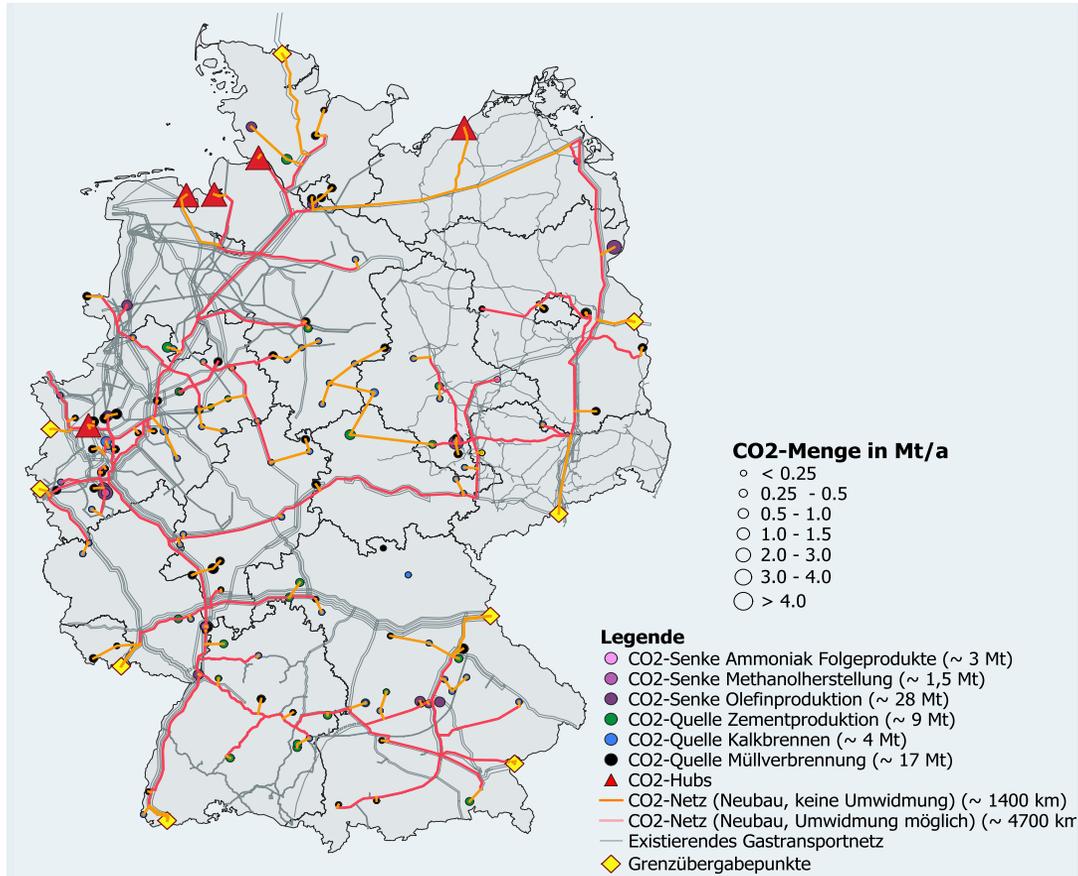


Import/Export Werte für 2045

*CCU: Carbon Capture and Utilization

**WtE: Müllverbrennung

Quelle: Fraunhofer ISI



	Szenario Name	Basis	Import	Export	CCU*	WtE**
1	Standard	O45-E	–	–	✓	✓
2	Transit/Import Fokus	O45-H2	12 Mt/a	–	✓	✓
3	Max Transport	O45-H2 40 Mt/a	20 Mt/a	–	–	✓ +20%
4	Export Fokus	O45-E	–	8 Mt/a	✓	✓
5	Begrenzter Transit + CCU	O45-H2	12 Mt/a	6 Mt/a	✓	✓
6	Begrenzter Transit	O45-H2	12 Mt/a	6 Mt/a	–	✓

CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Szenarien importieren



Import/Export Werte für 2045

*CCU: Carbon Capture and Utilization

**WtE: Müllverbrennung

Quelle: Fraunhofer ISI

in Mt/a	2045
Senken CCU	-
H2-basierte Olefine	-
H2-basiertes Methanol	-
Folgeprodukte Ammoniak	-
Legierung Stahl	-
Quellen	
Abscheidung Zement	8,49
Abscheidung Kalk	3,25
Abscheidung MVA	32,04
Davon nicht angeschlossen	0,194441
Hubs	
Brunsbüttel	16
Wilhelmshaven	21,58
Bremen	16
Rostock	10
Grenzverkehr	20
Polen	4
Österreich	6
Tschechien	8
Schweiz	1,5
Frankreich	0,5
Belgien	-
Niederlande	-
Dänemark	-
Bilanzkontrolle	0

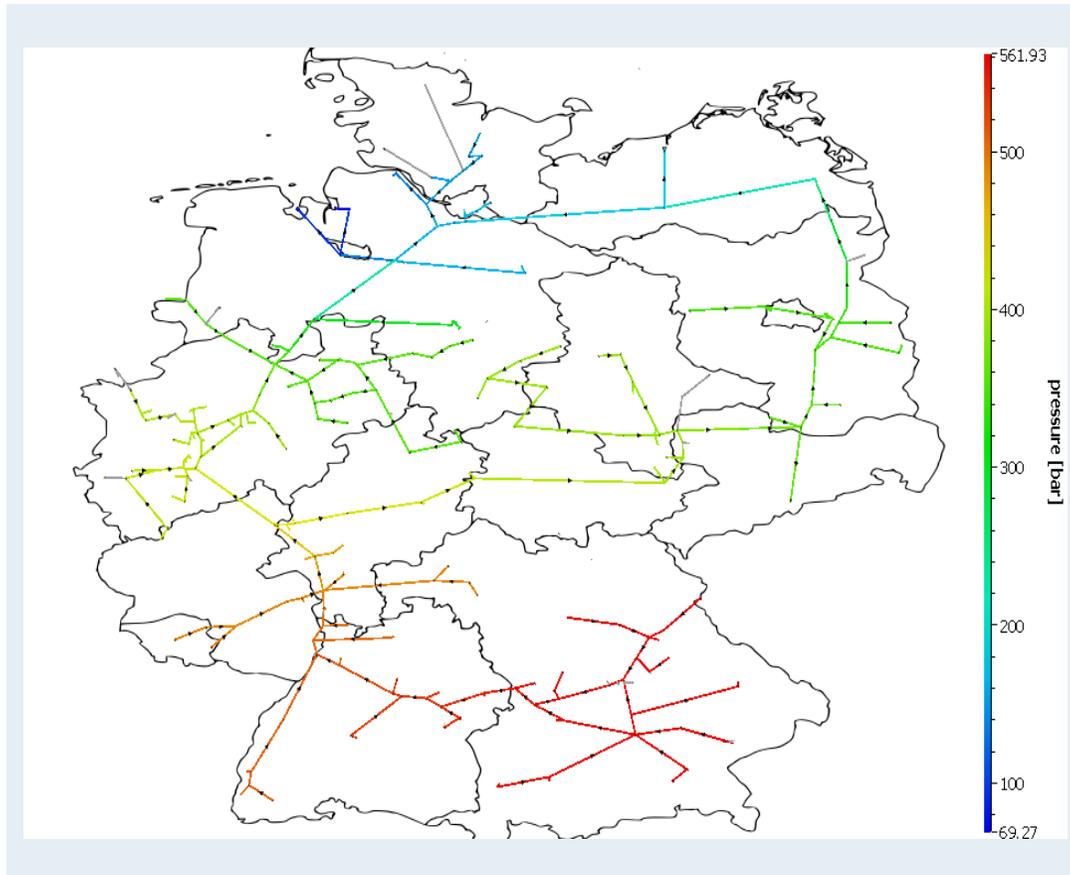
	Szenario Name	Basis	Import	Export	CCU*	WtE**
1	Standard	O45-E	-	-	✓	✓
2	Transit/Import Fokus	O45-H2	12 Mt/a	-	✓	✓
3	Max Transport	O45-H2 40 Mt/a	20 Mt/a	-	-	✓ +20%
4	Export Fokus	O45-E	-	8 Mt/a	✓	✓
5	Begrenzter Transit + CCU	O45-H2	12 Mt/a	6 Mt/a	✓	✓
6	Begrenzter Transit	O45-H2	12 Mt/a	6 Mt/a	-	✓

CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Die Ergebnisse: Max Transport (O45-H2)



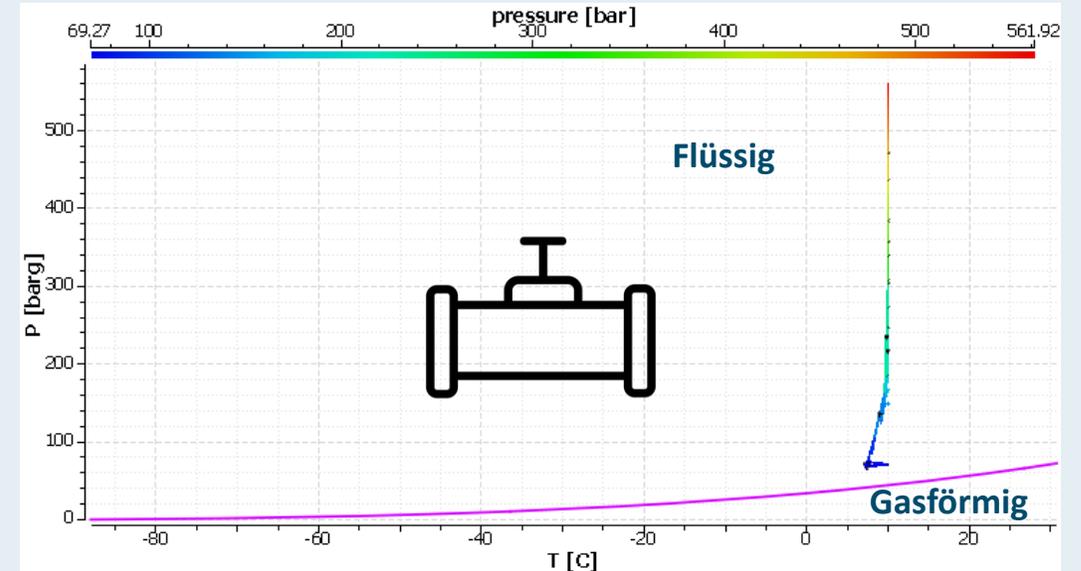
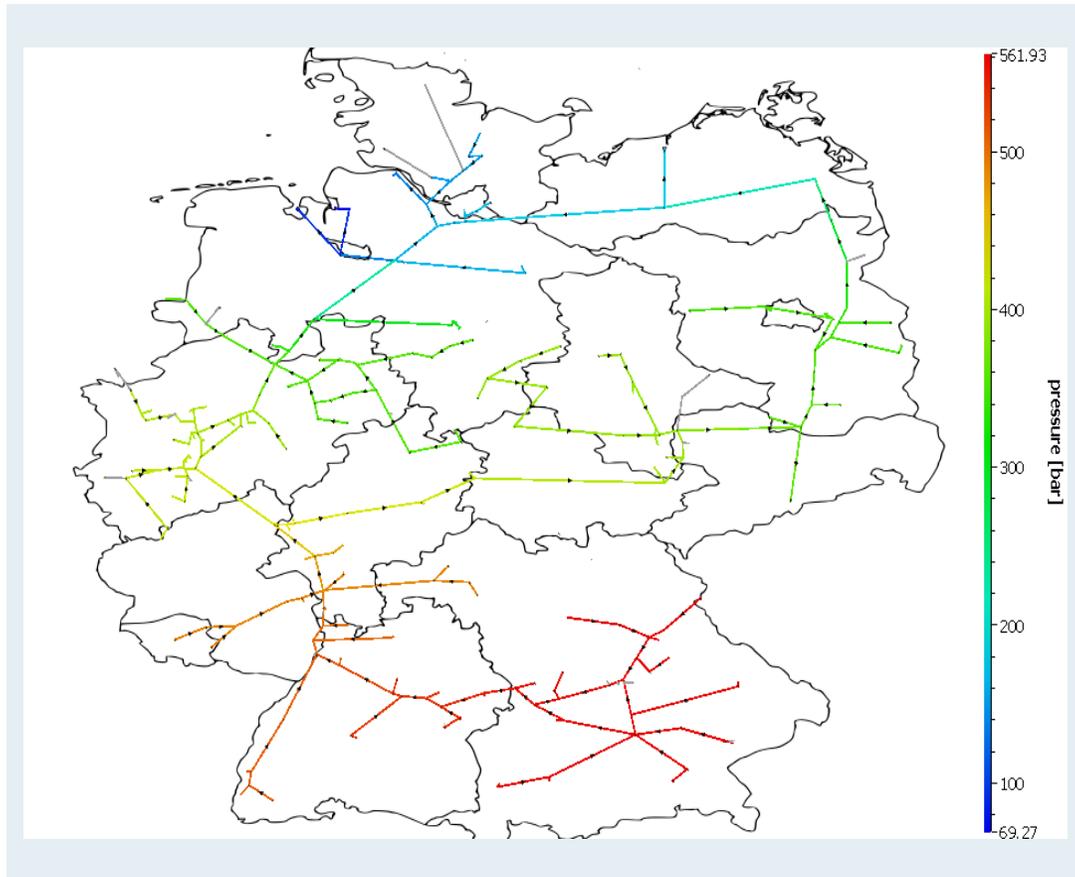
Anvari, M., et. al. Simulation of Pipeline Transport of Carbon Dioxide with Impurities. In INFOCOMP 2023: The Thirteenth International Conference on Advanced Communications and Computation, June 26-30, 2023, Nice, France (pp. 1-6).
https://www.thinkmind.org/articles/infocomp_2023_1_10_60008.pdf



- Stationäre Simulation
- Durchmesser: [50-100] cm
- Flüssigphase
- Bodentemperatur: 10° C
- Rauigkeit von Pipelines: 0.036

CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Die Ergebnisse: Max Transport (O45-H2)



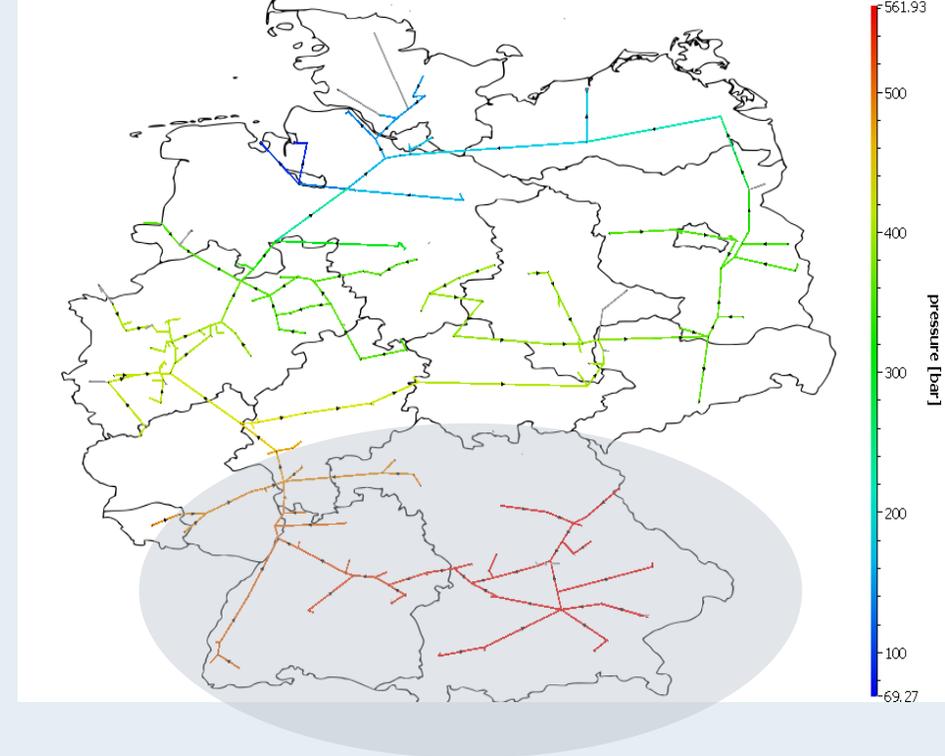
- Stationäre Simulation
- Flüssigphase
- Rauigkeit von Pipelines: 0.036
- Durchmesser: [50-100] cm
- Bodentemperatur: 10° C

CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Pumpen durch eine Hauptrohrleitung zu bauen

Segment-Methode

1. Flussmengen im ganzen Netz berechnen
($p > 200$ bar erlaubt)

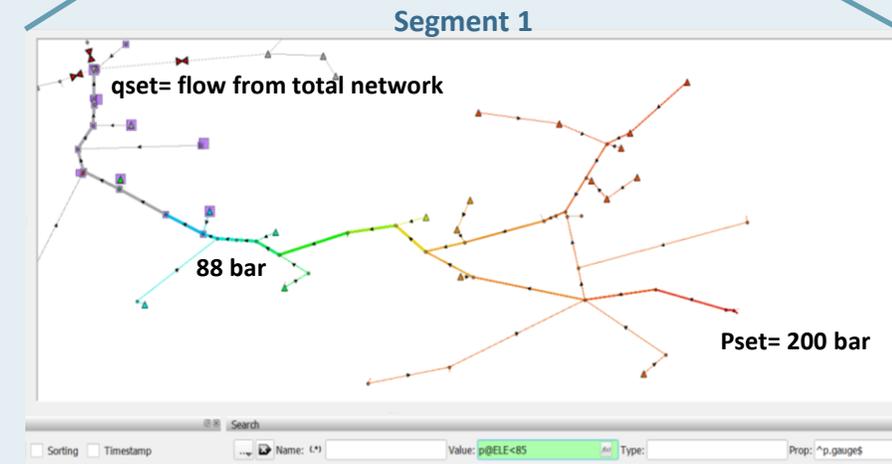
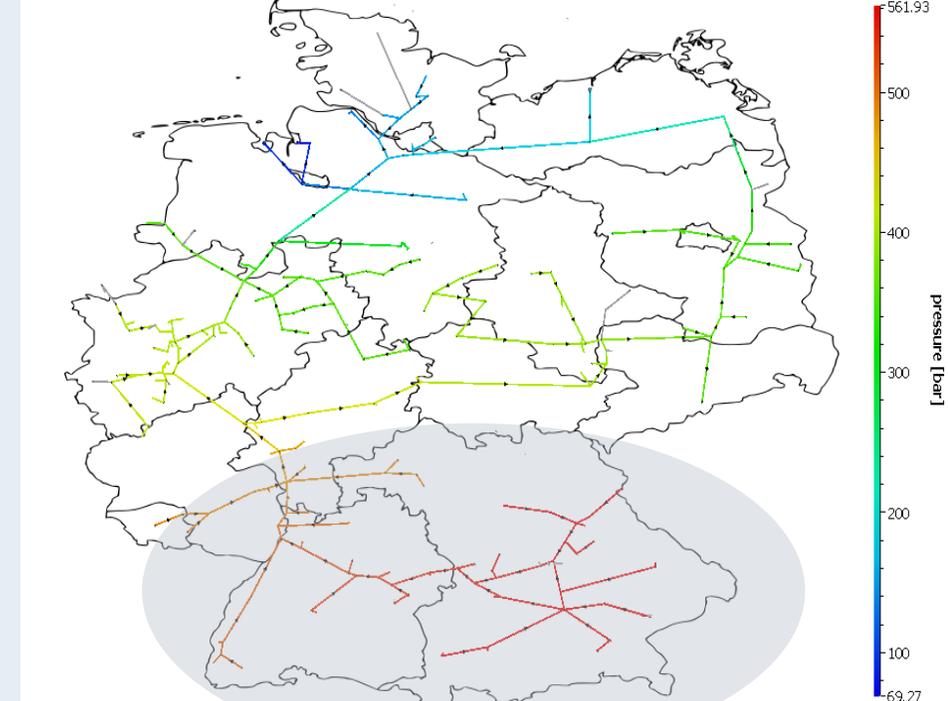


CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Pumpen durch eine Hauptrohrleitung zu bauen

Segment-Methode

1. Flussmengen im ganzen Netz berechnen ($p > 200$ bar erlaubt)
2. Im Gesamtnetz große Schleifen (Loops) vermeiden (=> Baumstruktur, dadurch eindeutige Flussmengen)
3. Kleine Loops sind akzeptabel

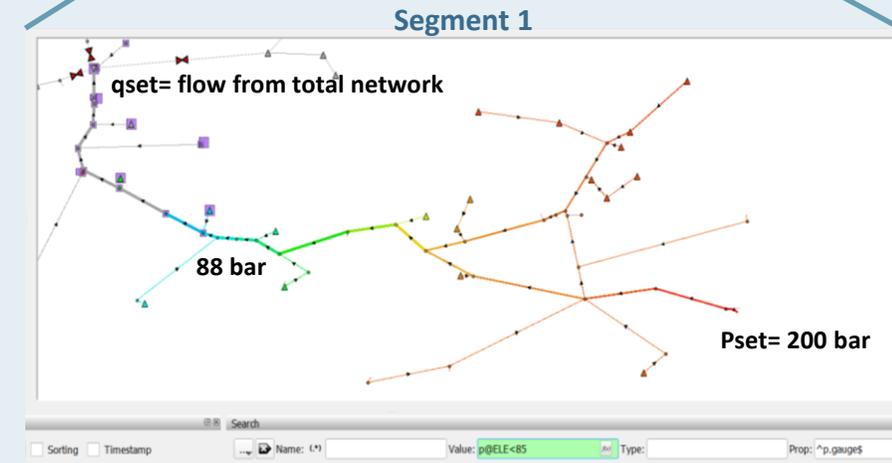
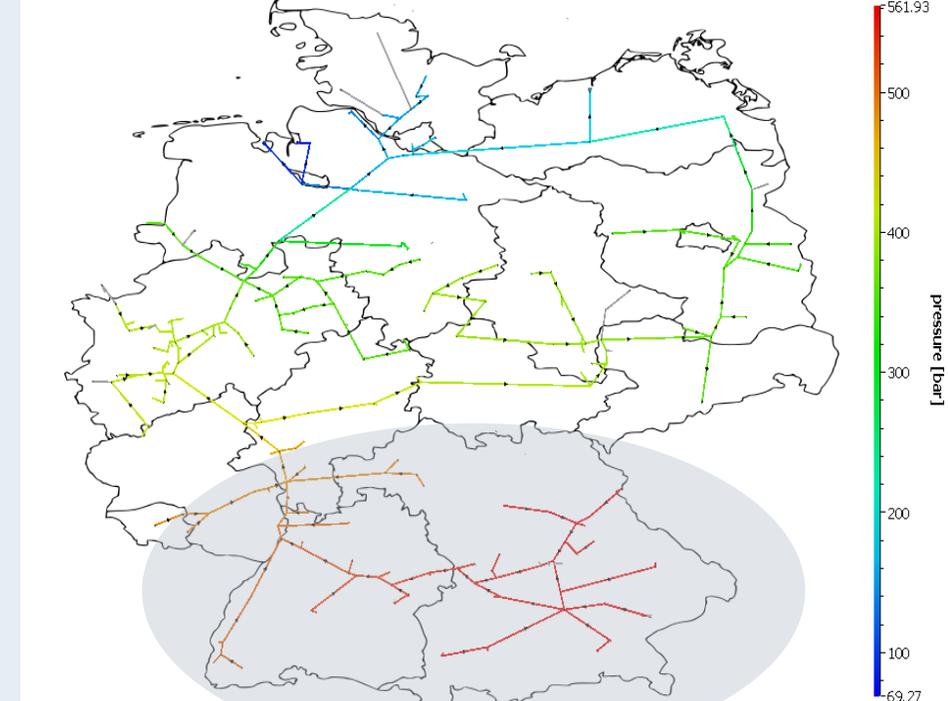


CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Pumpen durch eine Hauptrohrleitung zu bauen

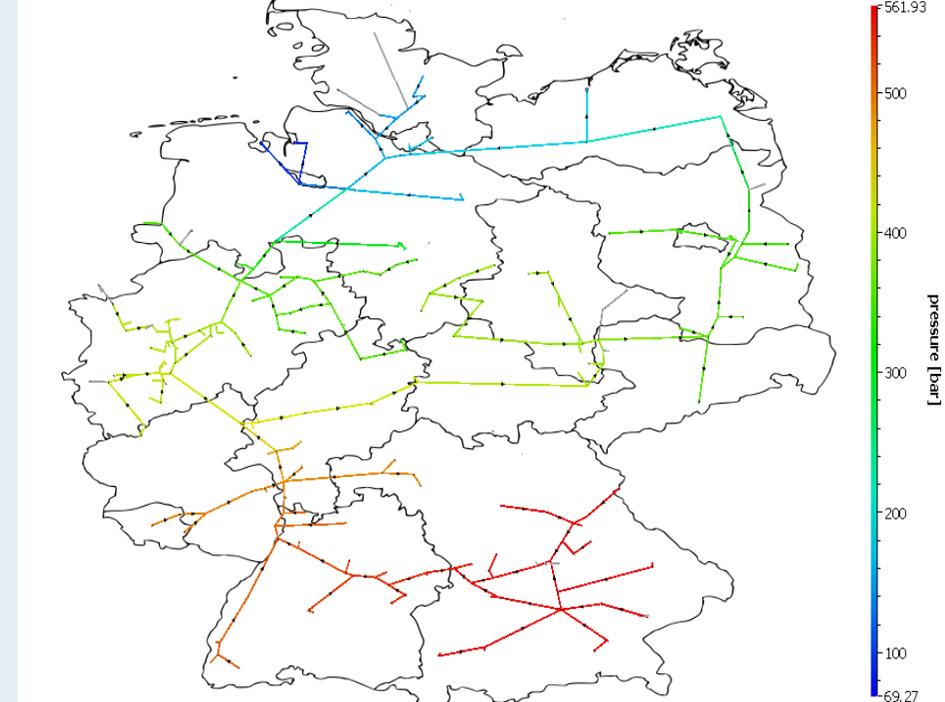
Segment-Methode

1. Flussmengen im ganzen Netz berechnen (in diesem ersten Schritt $p > 200$ bar erlaubt)
2. Im Gesamtnetz große Schleifen (Loops) vermeiden (=> Baumstruktur, dadurch eindeutige Flussmengen)
3. Kleine Loops sind akzeptabel
4. $p_{set} = 200$ barg am Entry mit höchtem Druck (aus Gesamtnetz) setzen
5. Dort, wo p unter 85 bar fällt, muss eine Zwischenpumpe gesetzt werden



CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Optimierung



Ergebnisse für 5000 KM-Pipelines [VDZ]--> 14 Mrd€

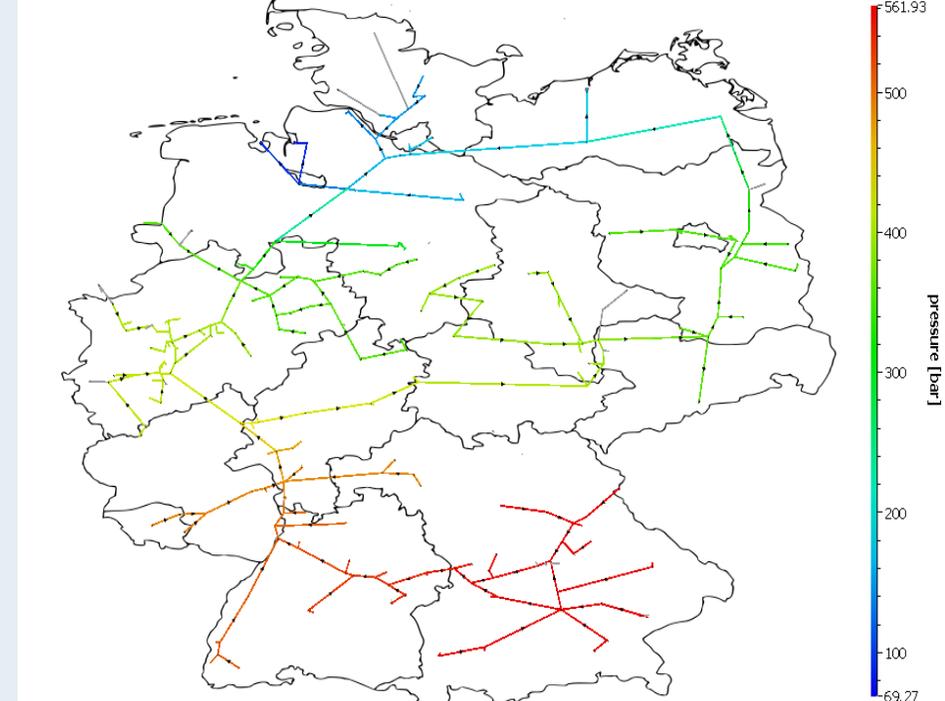
DN [cm]	50	70	90
Anzahl Zwischenpumpen	>20	4	0
Geschwindigkeit [m/s]	5,8	3,0	1,9
Kosten der Pipeline [€/m]	2.500	3.000	3.500
Gesamtkosten der Pipeline [Mrd€]	12.5	15.	17.5

CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Optimierung

Zentrale Botschaft

- Das deutsche CO₂-Netz kann - in diesem Szenario mit 50-cm-Rohren - nur mit geplanten Exportpipelines nach Westen wirtschaftlich und sicher betrieben werden (sonst $V > 5$ m/s).
- Der Export von CO₂-Mengen nach Belgien würde das deutsche Netz entlasten und kleinere Rohrdurchmesser ermöglichen.
- Mit $D=70$ cm wäre ein Betrieb auch ohne Export in diesem Szenario möglich.



Ergebnisse für 5000 KM-Pipelines [VDZ]--> 14 Mrd€

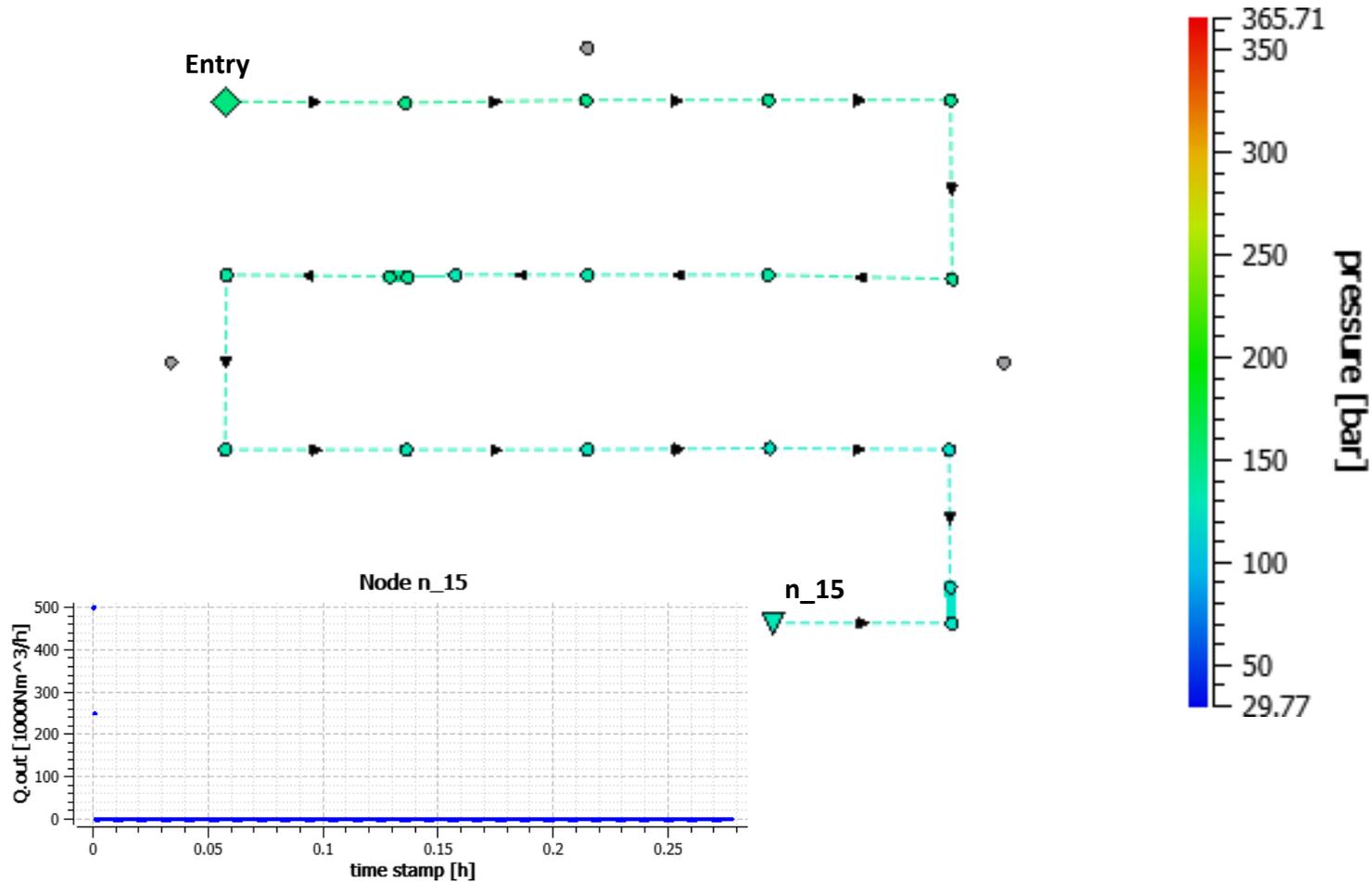
DN [cm]	50	70	90
Anzahl Zwischenpumpen	>20	4	0
Geschwindigkeit [m/s]	5,8	3,0	1,9
Kosten der Pipeline [€/m]	2.500	3.000	3.500
Gesamtkosten der Pipeline [Mrd€]	12.5	15.	17.5

Wie kann man ein Modell entwickeln, das der Realität näher kommt?

- Durchmesser der Hauptleitungen erhöhen, wenn die Geschwindigkeit 4 m/s übersteigt.
 - **Hinweis:** Die korrekten Höhen werden die Geschwindigkeit wahrscheinlich weiter erhöhen.
- Segmentmethode mit geänderten Durchmessern wiederholen, um die Anzahl der Pumpen zu ermitteln.
 - **Hinweis:** Bei 90 cm und korrigierten Höhen werden keine Zwischenpumpen benötigt, aber die Rohre sind kostspieliger wegen höherem Materialverbrauch.

CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Transient Model



Anvari, M., et. al., Stability of dynamic fluid transport simulations. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2701, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.

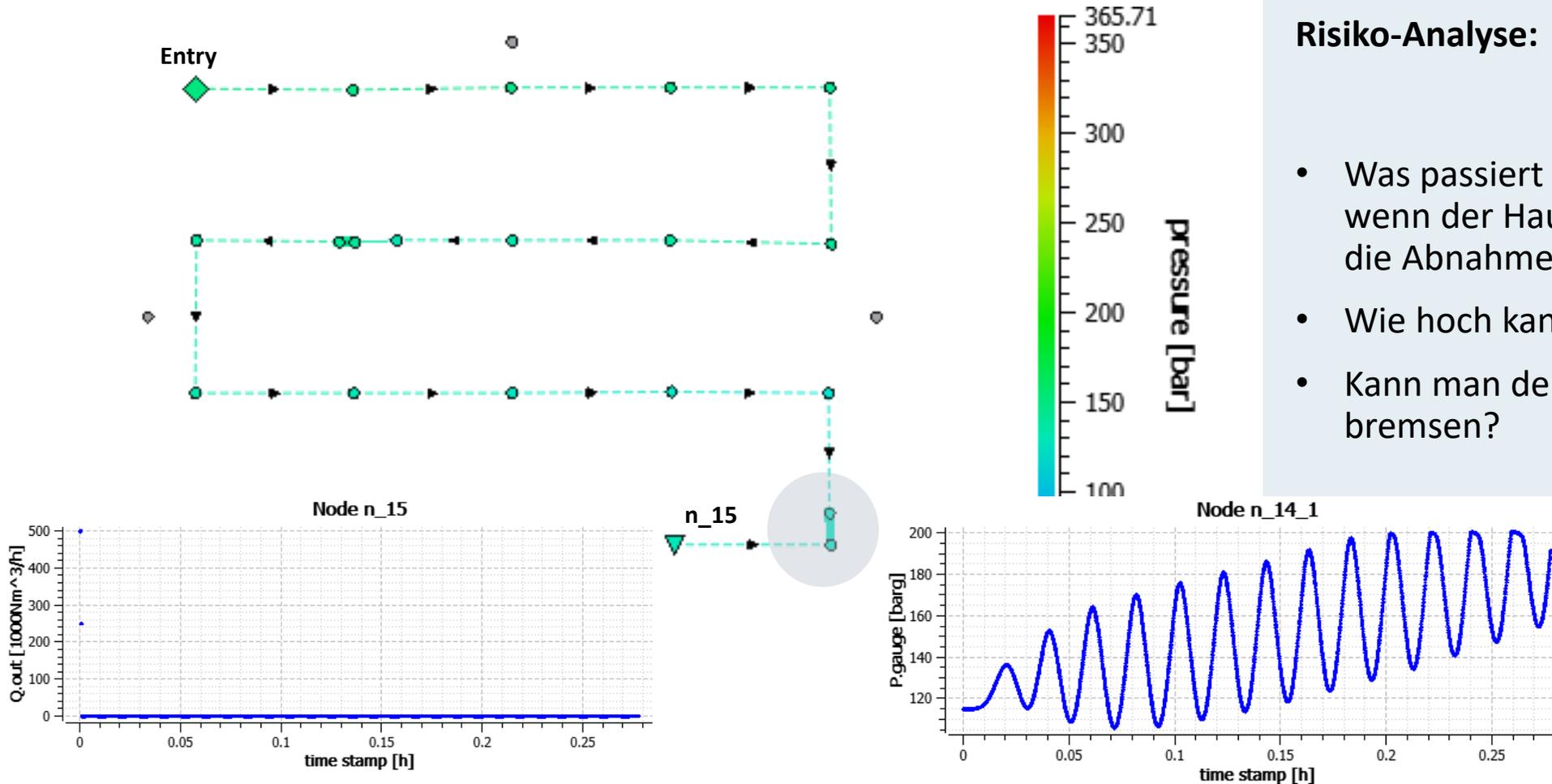
Risiko-Analyse:

- Was passiert mit einer CO₂-Pipeline, wenn der Hauptabnehmer plötzlich die Abnahme stoppt?

CO₂-Netzwerksimulation in MYNTS

Transient Model

Anvari, M., et. al., Stability of dynamic fluid transport simulations. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2701, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.



Risiko-Analyse:

- Was passiert mit einer CO₂-Pipeline, wenn der Hauptabnehmer plötzlich die Abnahme stoppt?
- Wie hoch kann der Druck ansteigen?
- Kann man den Druckanstieg bremsen?

What is next?

Eastern Lights Projekt



<https://eastern-lights.eu/>

What is Eastern Lights?

The Eastern Lights project creates practical tools, knowledge, and infrastructure to reduce CO₂ emissions and help Europe reach climate neutrality by 2050.

The project partners will:

- investigate the possibilities for **storing CO₂** in Bulgaria
- test ways to **transport CO₂** across countries
- create systems to **monitor** the entire process
- support governments in **shaping regulations** related to Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS)
- engage with the public to **raise awareness** and understanding



Zusammenarbeit mit der Industrie

- **Pipelines für verschiedene Szenarien planen, simulieren und optimieren.**
 - für Deutschland und sogar das EU-CO₂-Transportnetz [1].
 - Kostenanalyse für CO₂-Infrastruktur.
- **Speicherdynamik während des Transports modellieren.**
- **Gekoppelte Simulation von H₂- und CO₂-Netzen.**
- **Berechnungen selbstständig durchführen oder eine Lizenz für die erforderlichen Tools erwerben oder Studien gemeinsam mit Fraunhofer durchführen.**

[1] https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC136709/JRC136709_01.pdf



VIELEN DANK FÜR IHRE
AUFMERKSAMKEIT!

Diskussion und Q&A

Zusammenfassung

Methodisch

- **Methoden** inkl. Daten verfügbar, **einsatzbereit und erprobt für vertiefende Analysen**
- Methodik erlaubt Berechnung eines konkreten **CO₂-Transportnetz** ausgehend vom Bedarf des zukünftigen Energiesystems
- **Netzoptimierer** erlaubt agile Bewertung veränderter Rahmenbedingungen auf Leitungsbedarf
- **Physikalische Simulation** erlaubt robuste Bewertung als Planungsgrundlage

Inhaltlich

- **Relevante Mengen schwer vermeidbarer CO₂-Emissionen** Zement, Kalk, Müllverbrennung plus Transit bei ~60 Mio. t/Jahr
- **Großräumige Verteilung der robusten Systemelemente** über Deutschland > 3000km
- **Hohe Unsicherheiten** beim Thema CCU, biogene Quellen und grenzüberschreitendem CO₂-Handel

Wie schaffen die Analysen Mehrwert für die Umsetzung?

Wo sehen Sie Relevanz für die Umsetzung? Wie können die Modellergebnisse die Umsetzung unterstützen?

Unternehmen/Verband mit Interesse an CCUS

1. Entwicklung konsistenter Dekarbonisierungspfade und Szenarien
2. Auslegung lokaler Pipelinetopologien bis hin zum europäischen Transportnetz
3. Bewertung von Alternativtechnologien und Transformationspfaden

Unternehmen mit Interesse an CCUS

1. Bewertung von Transformationspfaden für Ihren Standort und dessen Einbindung in ein Gesamtsystem
2. Kostenbetrachtung und Integration in ein entwickeltes CCUS-System
3. Ermittlung verschiedener Perspektiven für den CO₂-Transport

Künftige CO₂ Netzbetreiber

1. Berechnung eines robusten Netzes in verschiedenen Szenarien (Anzahl Anschlüsse, Mengen) und Ausbaustufen
2. Kopplung and physikalische Strömungssimulation durch Kopplung an MYNTS bei Fraunhofer SCAI
3. Durchführung einer Kostenanalyse und Optimierung der Netzwerk-Infrastruktur