

Analyse von Transport-Optionen für flüssigen Wasserstoff in Deutschland

08. SEPTEMBER 2021

TONI BUSCH, BASTIAN GILLESSEN, JOCHEN LINßEN, DETLEF STOLTEN

IEWT 2021

Wien/Online

T.Busch@FZ-Juelich.de

Agenda

Motivation

Stand der Wissenschaft

Methodik und Ergebnisse

Key Takeaways

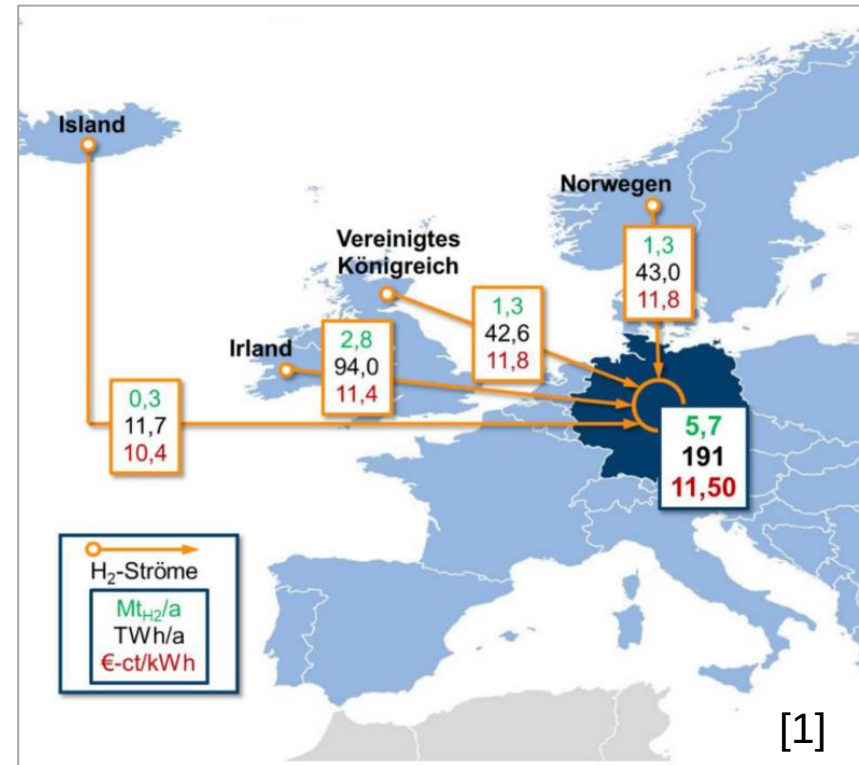
Motivation: Umgang mit importiertem flüssigem Wasserstoff

Laut H₂ Roadmap NRW [1] werden in Deutschland bis 2050...

- ~150 TWh/a LH₂ zur Deckung des GH₂-Bedarfs
- aus europäischen Nachbarländern (Irland, UK, Norwegen, Island)
- an norddeutschen Häfen importiert.

[16]	GH ₂ p = 1 bar T = 25°C	CGH ₂ p = 300 bar T = 25°C	LH ₂ p = 1 bar T = -253°C
kWh/m ³	3	731	2360

- Lohnt es sich H₂ in flüssiger Form zu transportieren?
- Welche Verkehrsmittel kommen dafür infrage?
- Welche Rolle spielt die Art der Wasserstoffnachfrage (LH₂ vs. GH₂) dabei?



Agenda

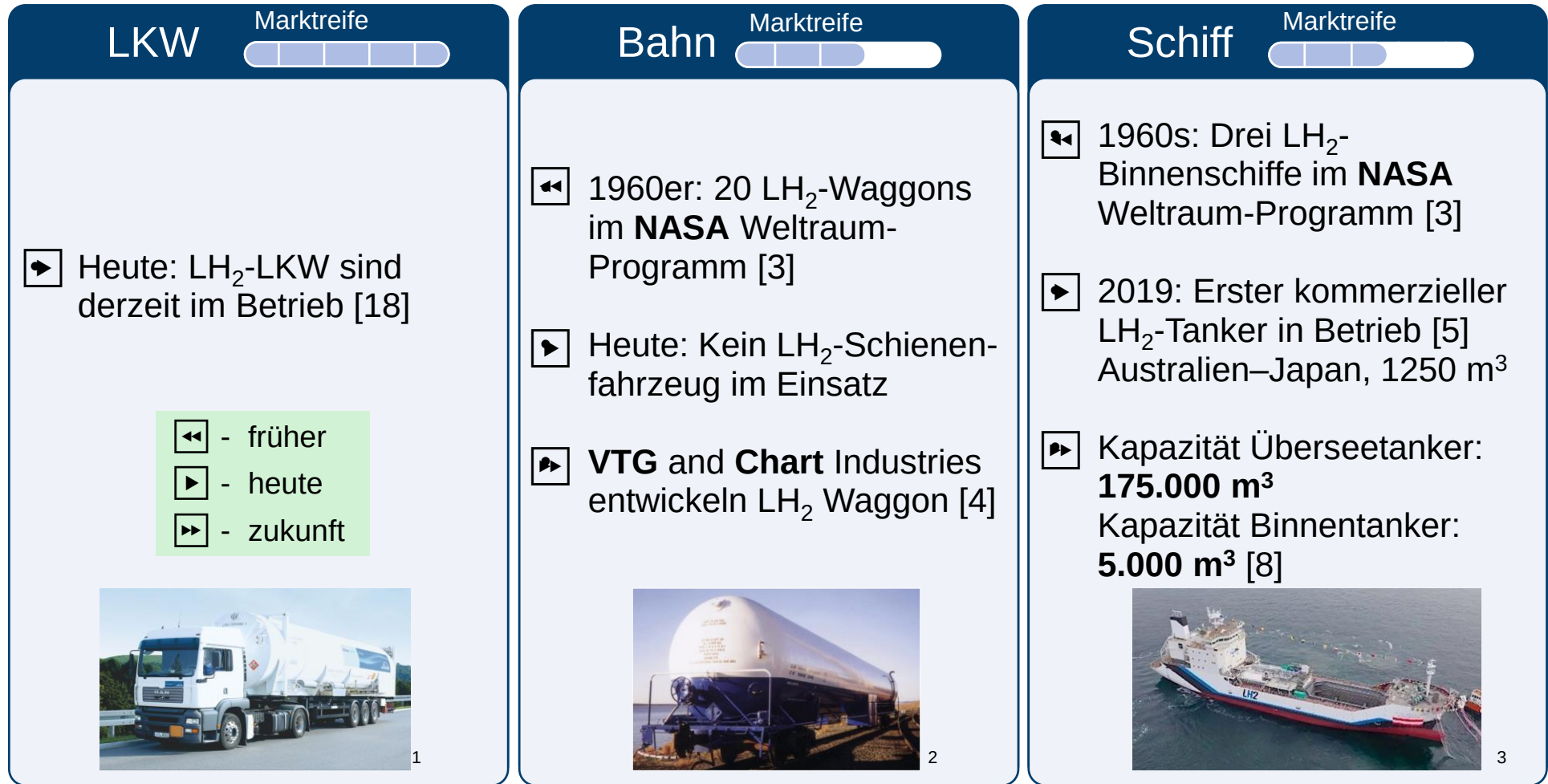
Motivation

Stand der Wissenschaft

Methodik und Ergebnisse

Key Takeaways

Status Quo: Der aktuelle Entwicklungsstand von LH₂-Transportmittel



Bildquellen:

¹Cryo Star, cryostar-hydrogen-solutions.com/hydrogen-distribution/

²Chart Industries, energy.gov/sites/prod/files/2019/04/f62/fcto-h2-at-rail-workshop-2019-nason-larson.pdf

³Kawasaki, global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487

LH₂-Transport per Bahn und Binnenschiff wurden bisher wenig beachtet

	LKW				Bahn				Binnenschiff				Überseeschiff				Pipe- line
	GH ₂	LH ₂	LOHC	NH ₃	GH ₂	LH ₂	LOHC	NH ₃	GH ₂	LH ₂	LOHC	NH ₃	GH ₂	LH ₂	LOHC	NH ₃	GH ₂
Niermann, 2021	x	x	x											x	x		
Lahnaoui, 2021	x	x	x														
Reus, 2021	x	x	x														x
Ishimoto, 2020													x			x	
DB Energie, 2020					x												
Ocho, 2018	x				x												
Almansoori, 2016	x	x			x	x							x	x			
Teichmann, 2012	x	x	x											x	x		
Yang, 2007	x	x															x

Agenda

Motivation

Stand der Wissenschaft

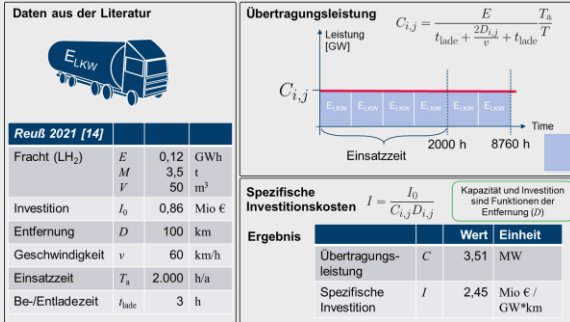
Methodik und Ergebnisse

Key Takeaways

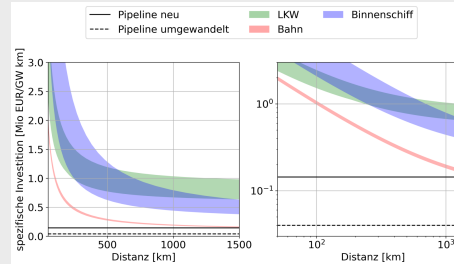
Methodisches Vorgehen

Input

Literaturdaten

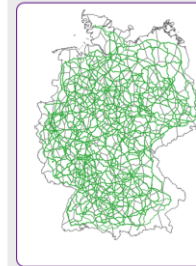


Prozessierte Daten

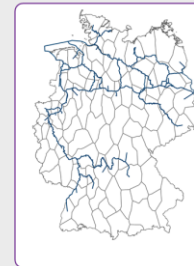


Transport-Routen

Straßen



Binnenwasserstraßen



Schienen

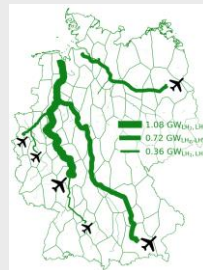


Optimierung

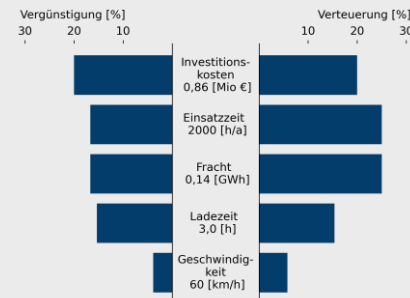
FINE.Infrastructure

Ergebnisse

Optimierungsergebnisse



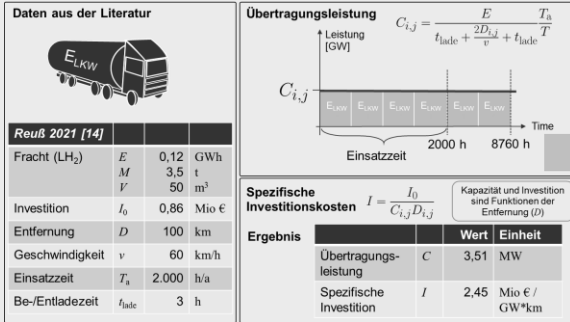
Sensitivität



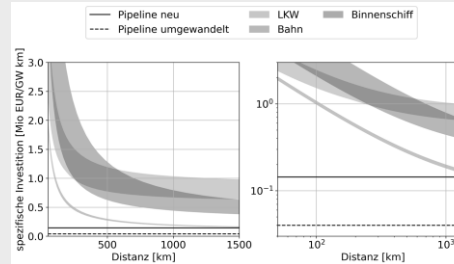
Methodisches Vorgehen

Input

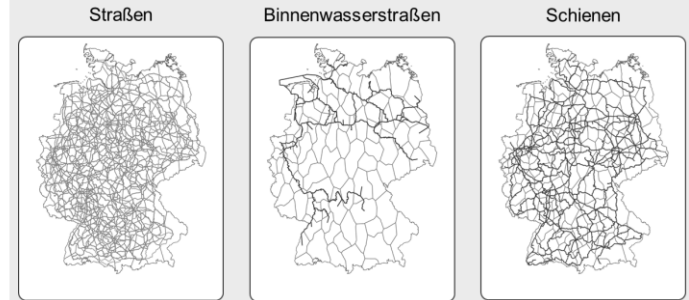
Literaturdaten



Prozessierte Daten



Transport-Routen

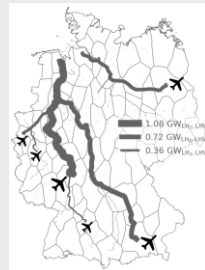


Optimierung

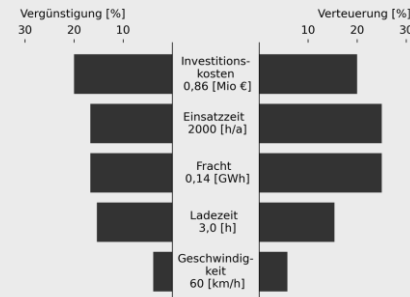
FINE.Infrastructure

Ergebnisse

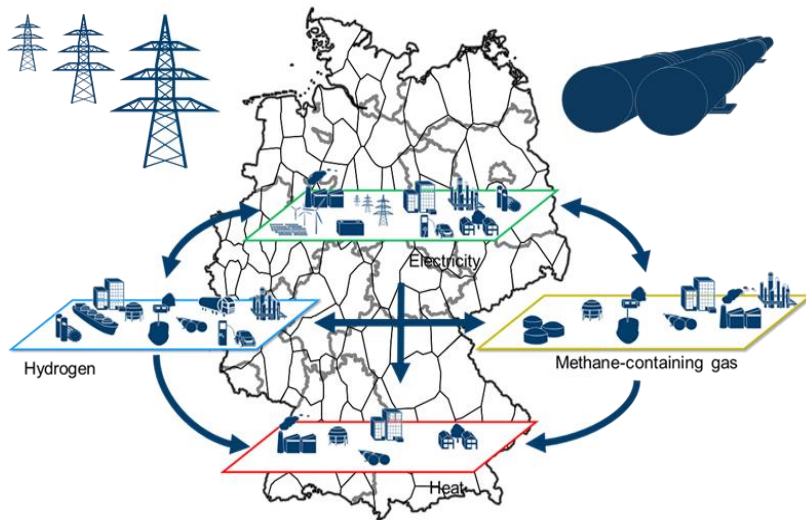
Optimierungsergebnisse



Sensitivität



FINE.Infrastructure: Optimierung (MILP) von Energiesystemen mit zeitlich und regionaler Auflösung



Zwei Bedarfs-Szenarien:

1. **273 TWh GH_2 -Bedarf**
in der Industrie, dem Verkehr
und dem Gebäudesektor
(FINE.NESTOR)
2. **273 TWh GH_2 -Bedarf**
+33 TWh LH_2 -Bedarf
im Flugsektor

Abgebildete Komponenten (Auswahl)

- Transmission: AC-Trassen, DC-Trassen, Pipelines
- Erzeugung: (Gas)-Kraftwerke, Elektrolyseure, PV, Wind
- Speicher: Batterien, Salzkavernenspeicher, Kugelspeicher
- Senken: Industrie, Haushalte, GHD, Verkehr
- Energieträger: Strom, Wasserstoff, Erdgas, Wärme

Erweiterung des Modells

+ Bahn, LKW, Binnenschiff

(+ Flugverkehr)

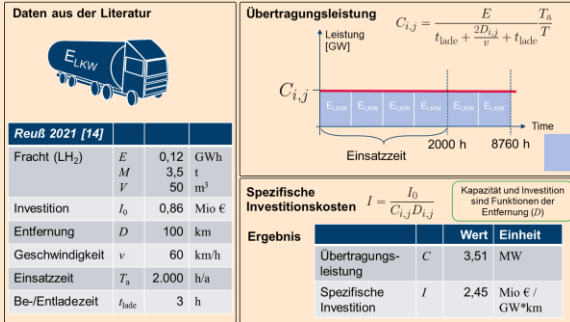
+ LH_2

Bildquelle: Theresa Groß, IEK-3

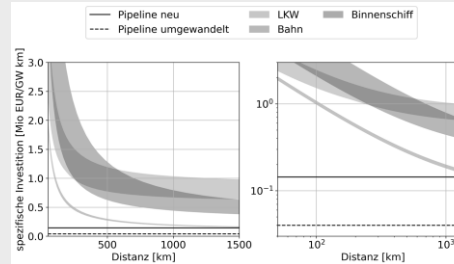
Methodisches Vorgehen

Input

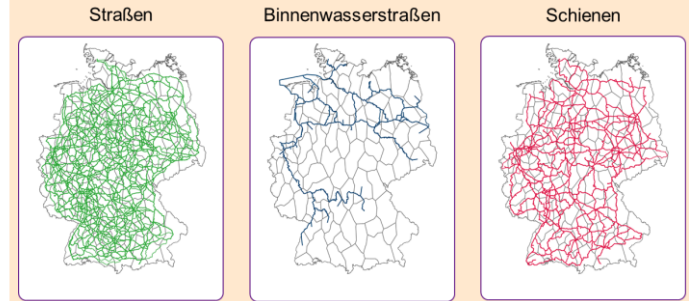
Literaturdaten



Prozessierte Daten



Transport-Routen

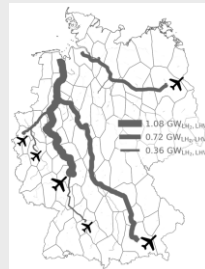


Optimierung

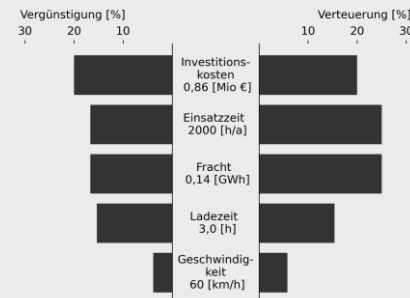
FINE.Infrastructure

Ergebnisse

Optimierungsergebnisse

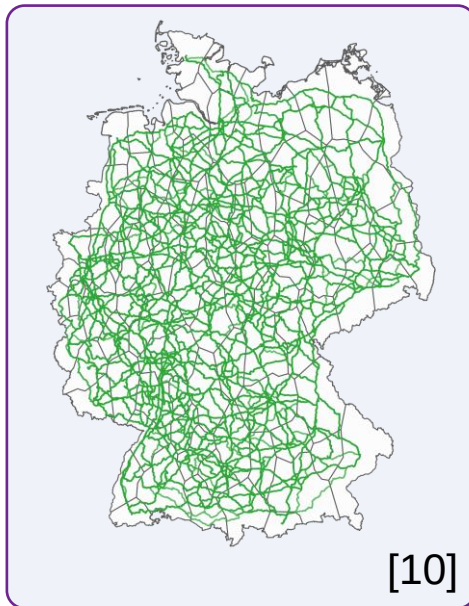


Sensitivität



Mittels des Dijkstra-Algorithmus werden die kürzesten Routen zwischen Regionsmittelpunkten berechnet.

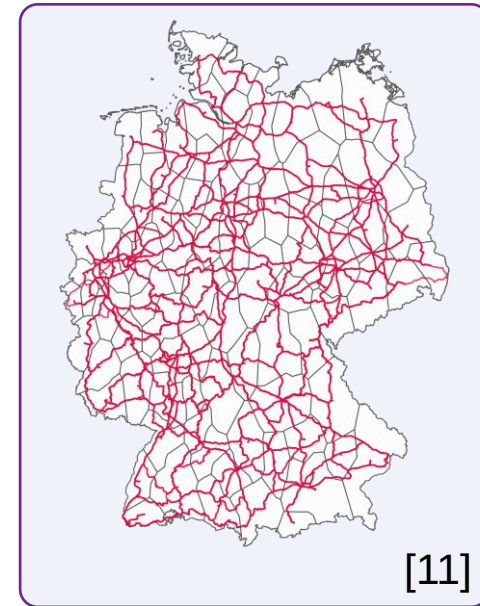
Straßen



Binnenwasserstraßen



Schienen



Methodik der Kostenberechnung: Von Energiemenge zu Leistung

Daten aus der Literatur



<i>Reuß 2021 [14]</i>			
Fracht (LH ₂)	E	0,12	GWh
	M	3,5	t
	V	50	m ³
Investition	I_0	0,86	Mio €
Entfernung	D	100	km
Geschwindigkeit	v	60	km/h
Betriebsstunden	T_a	2.000	h/a
Be-/Entladezeit	t_{lade}	3	h

Ausgangsgröße:
Invest = EUR / GWh

Zielgröße:
spezifischer Invest = EUR / GW*km

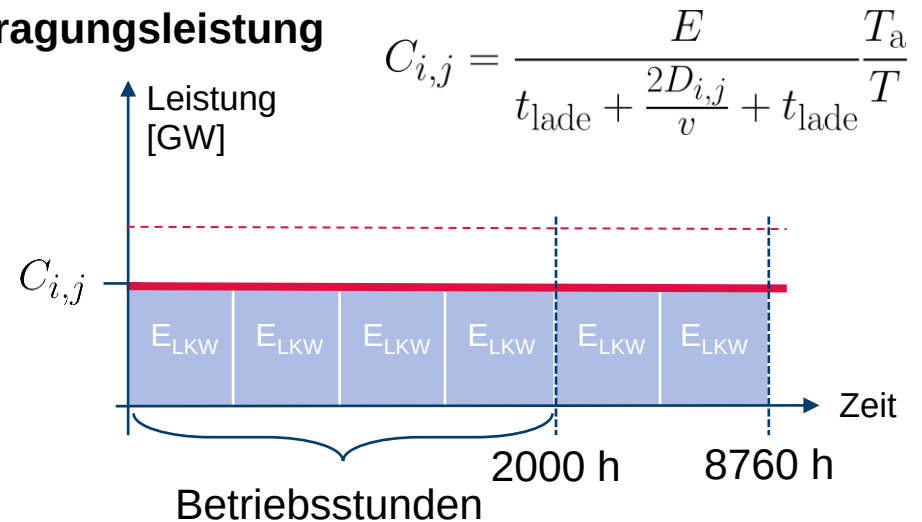
Methodik der Kostenberechnung: Von Energiemenge zu Leistung

Daten aus der Literatur



Reuß 2021 [14]			
Fracht (LH ₂)	E	0,12	GWh
	M	3,5	t
	V	50	m ³
Investition	I_0	0,86	Mio €
Entfernung	D	100	km
Geschwindigkeit	v	60	km/h
Betriebsstunden	T_a	2.000	h/a
Be-/Entladezeit	t_{lade}	3	h

Übertragungsleistung



Spezifische Investitionskosten

$$I_{i,j} = \frac{I_0}{C_{i,j} D_{i,j}}$$

Kapazität und Investition sind Funktionen der Entfernung (D)

Ergebnis

		Wert	Einheit
Übertragungsleistung	C	3,51	MW
Spezifische Investition	I	2,45	Mio € / GW*km

Spezifische Investitionskosten bei einer Referenzstrecke von 100 km

Ergebnis		<i>Reuß 2021 [14]</i>	<i>Amos 1998 [7]</i>	<i>Ishimoto 2020 [8]</i>	Einheit
Leistung	<i>C</i>	3,51	5,43	295,7	MW
Spezifische Investition	<i>I</i>	2,45	1,03	2,07	Mio € ₂₀₂₁ / GW*km

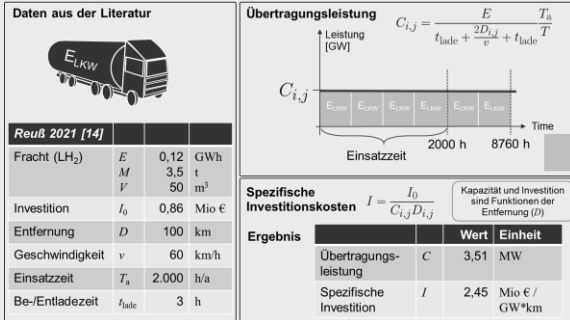


Input					
Fracht (LH ₂)	<i>E</i>	0,12	0,3	11,8	GWh
	<i>M</i>	3,5	9,1	354	t
	<i>V</i>	50	128	5.000	m ³
Investition	<i>I</i> ₀	0,86	0,56	40,9	Mio. € ₂₀₂₁
Entfernung	<i>D</i>	100	100	100	km
Geschwindigkeit	<i>v</i>	60	40	30	km/h
Betriebsstunden	<i>T</i> _a	2.000	8.400	8.000	h/a
Be-/Entladezeit	<i>t</i> _{lade}	3	24	24	h

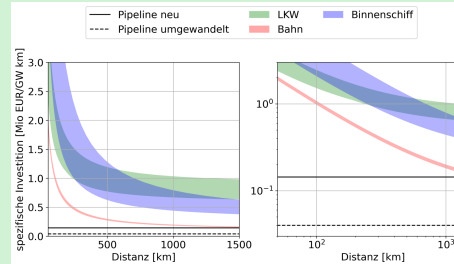
Methodisches Vorgehen

Input

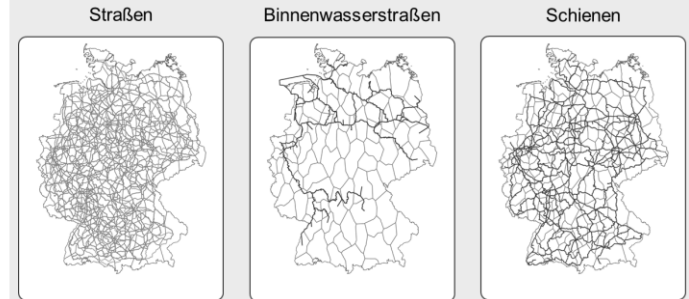
Literaturdaten



Prozessierte Daten



Transport-Routen

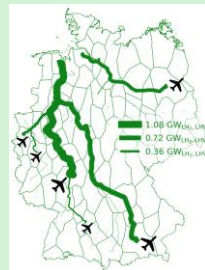


Optimierung

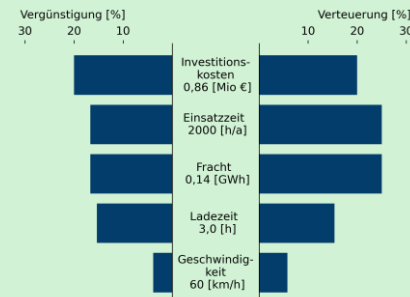
FINE.Infrastructure

Ergebnisse

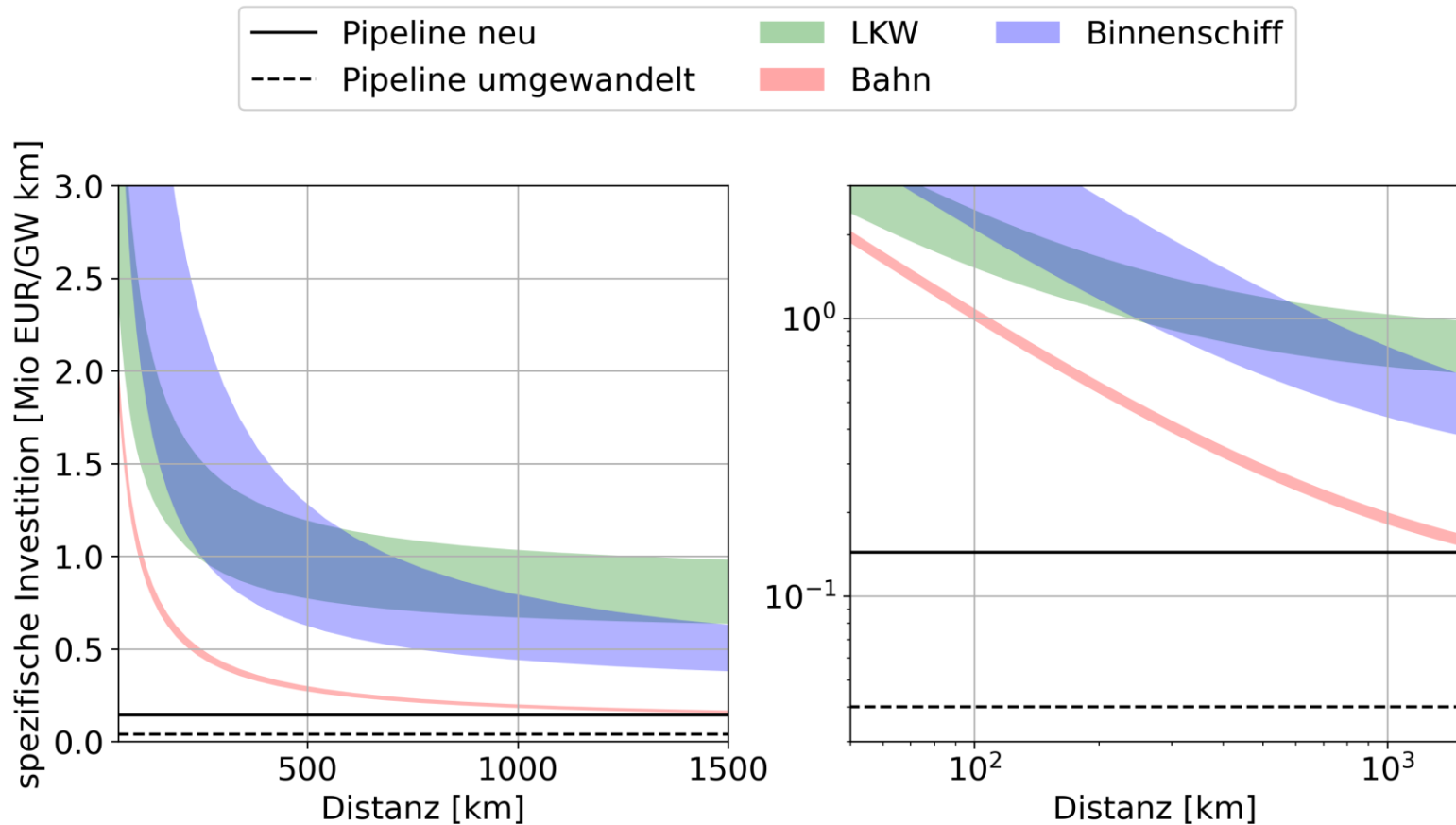
Optimierungsergebnisse



Sensitivität

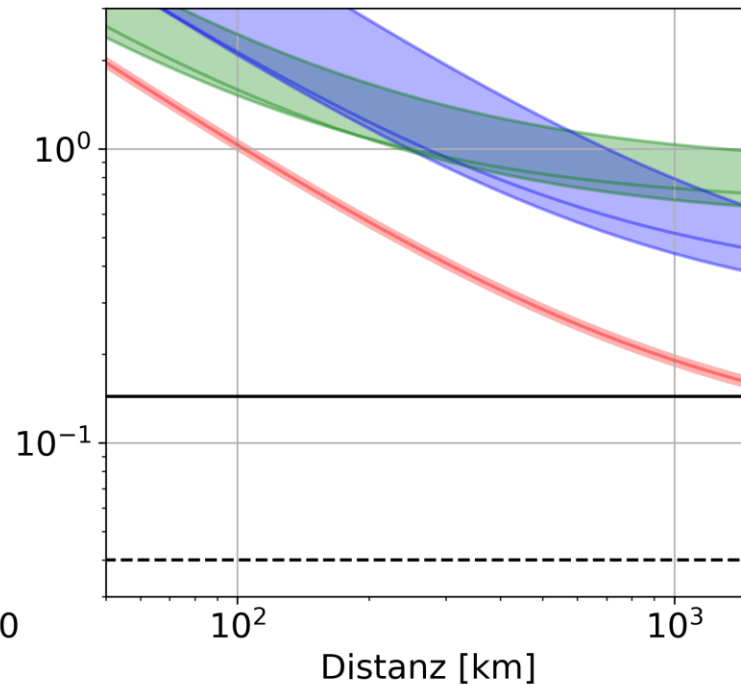
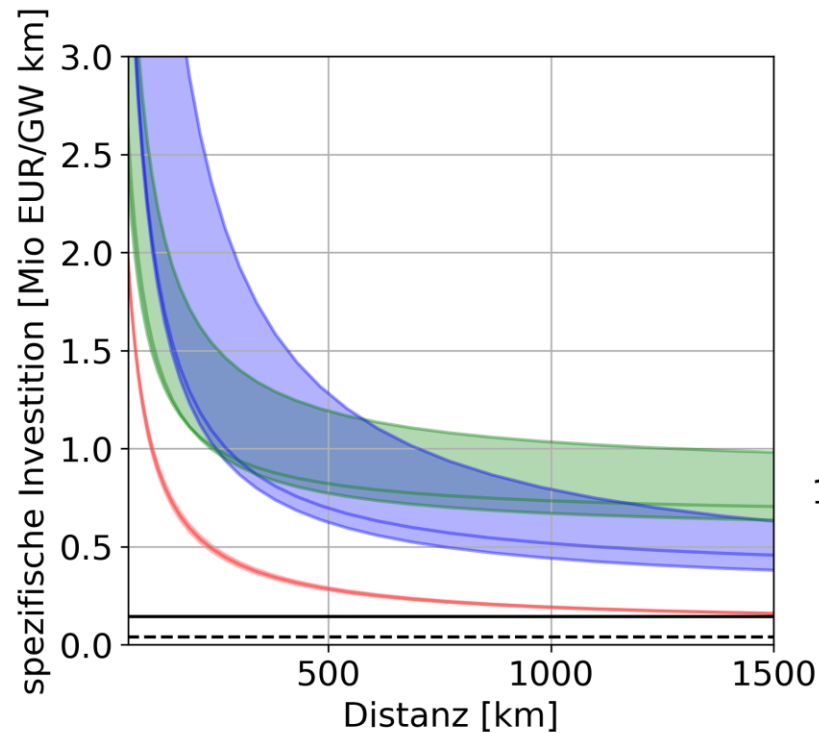
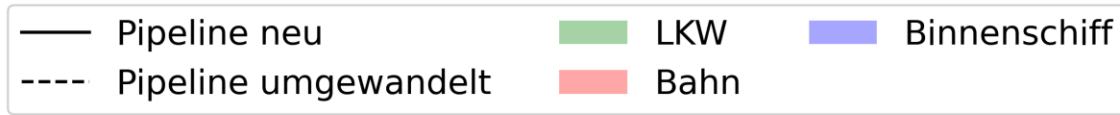


Spezifische Investitionskosten verschiedener Transportmittel in Abhängigkeit der Transportentfernung.



Kostendaten Inflationsbereinigt (Bezugsjahr 2021)

Spezifische Investitionskosten verschiedener Transportmittel in Abhängigkeit der Transportentfernung.



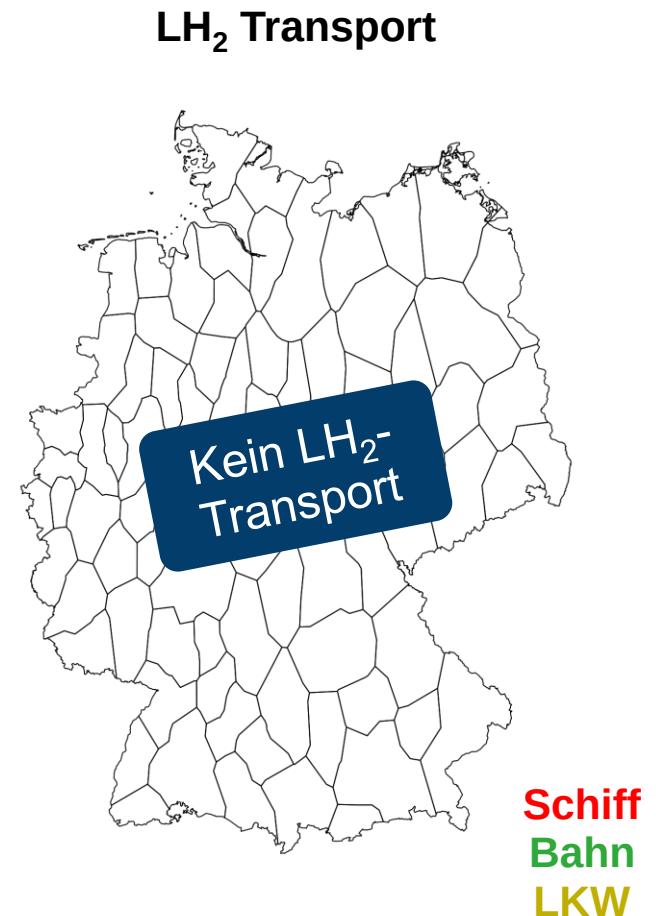
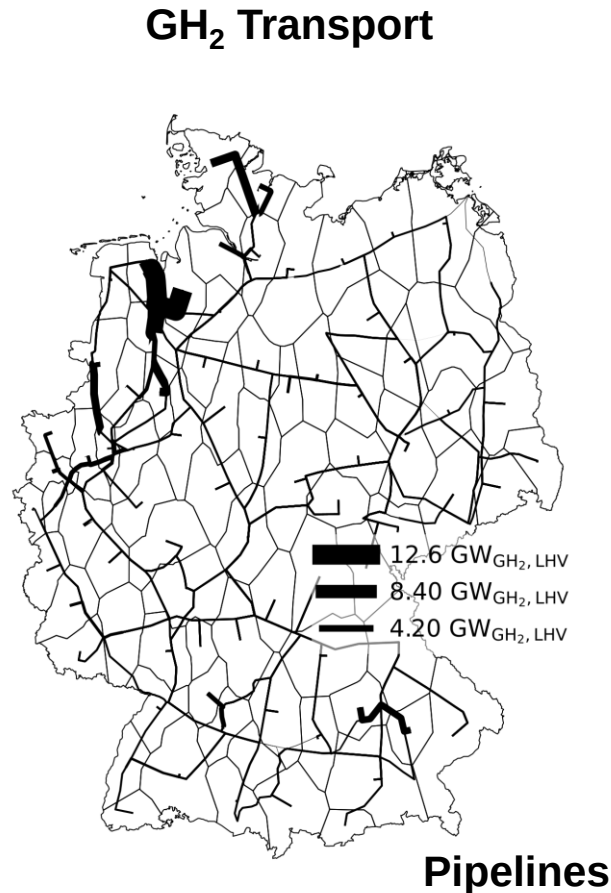
Quellen

- Reuß 2021 [14]
- Niermann 2021 [9]
- Teichmann 2012 [6]
- Teichmann 2012 [6]
- Ishimoto 2021 [8]
- Altmann 2001 [15]
- Amos 1998 [7]
- Welder 2019 [17]

Kostendaten Inflationsbereinigt (Bezugsjahr 2021)

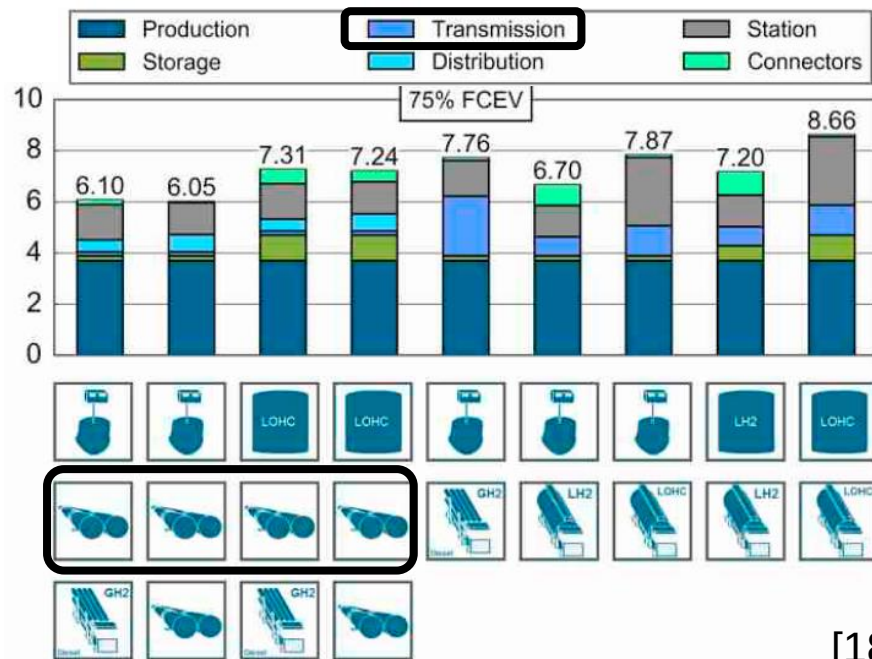
Optimierungsergebnisse zur Deckung des GH₂-Bedarfs

Energiemengen	TWh
Bedarf	
GH ₂	273
LH ₂	0
Import	
GH ₂	0,5
LH ₂	143
Umwandlung	
Elektrolyse	317
Regasifizierung	143
Verflüssigung	0
Transport	
Schiff	0
Bahn	0
LKW	0
Pipeline	704

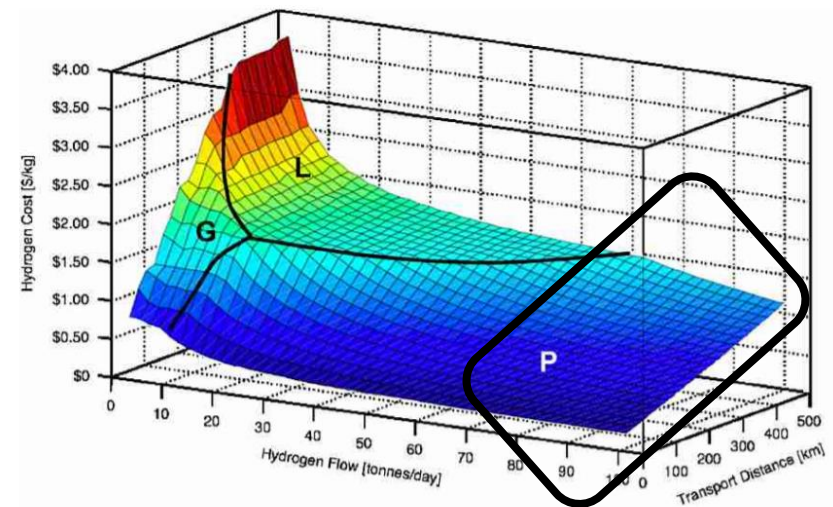


Plausibilisierung der Ergebnisse

Versorgung von Wasserstofftankstellen



GH₂ LKW vs. LH₂ LKW vs. Pipelines



Einschlägige Studien zeigen, dass der Transport per Pipeline (bei hohen Transportvolumina) die wirtschaftlichste Option im Vergleich zu LH₂-Transportmitteln darstellt.

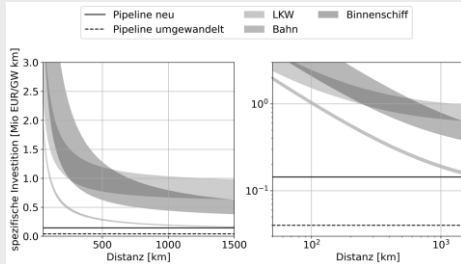
Methodisches Vorgehen

Input

Optimierung

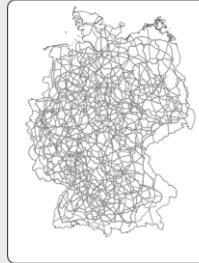
Ergebnisse

Prozessierte Daten

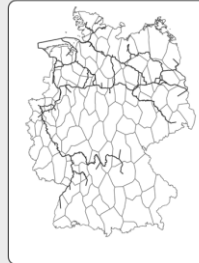


Transport-Routen

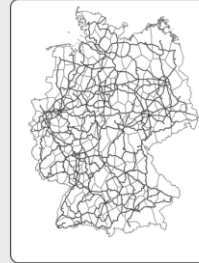
Straßen



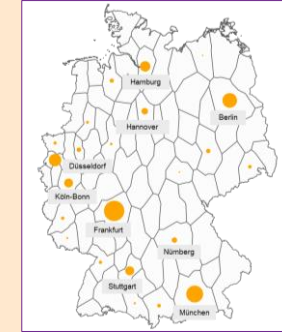
Binnenwasserstraßen



Schienen

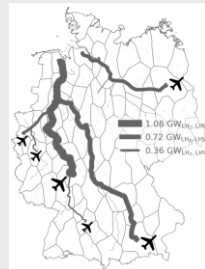


LH₂-Bedarfe

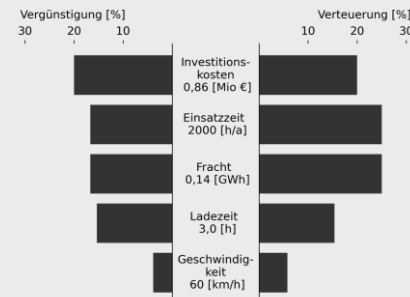


FINE.Infrastructure

Optimierungsergebnisse



Sensitivität

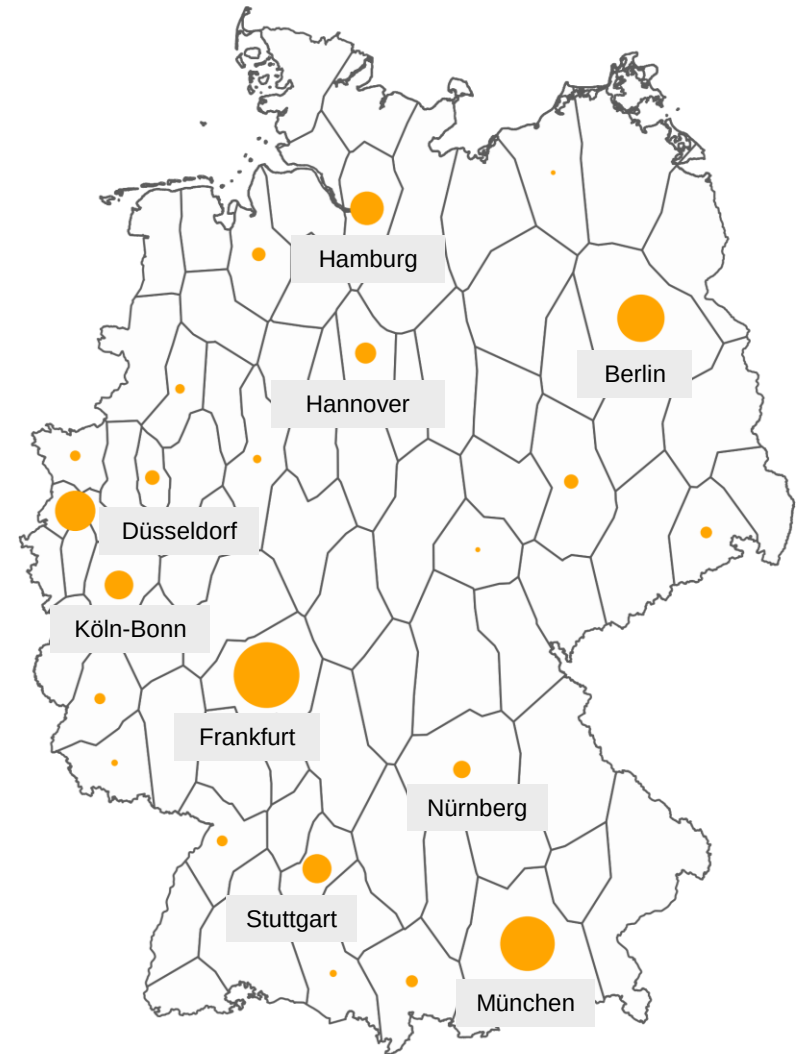


LH₂-Nachfrage in Höhe von 33 TWh im Flugsektor

Annahmen LH₂ Bedarf:

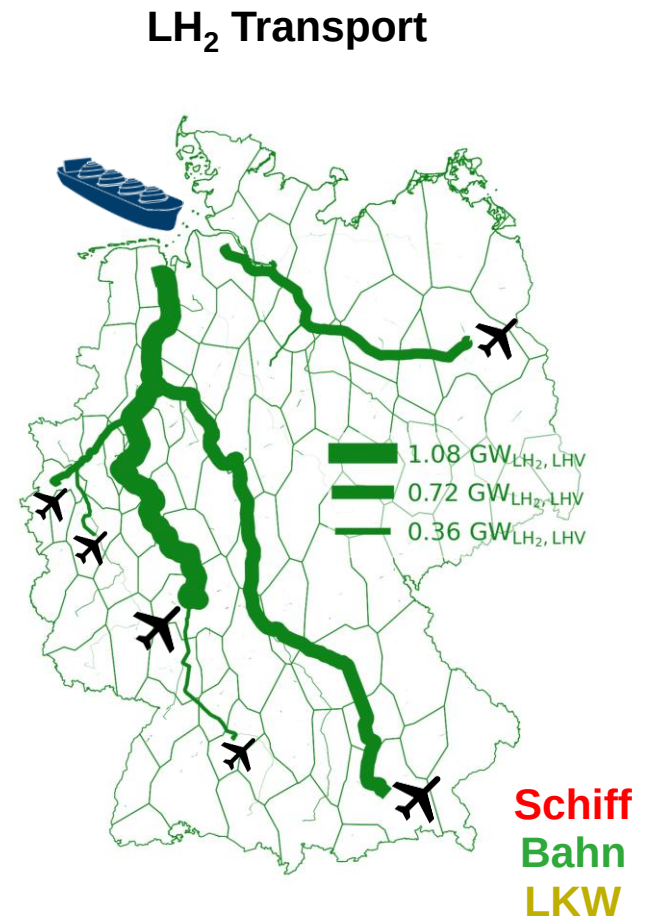
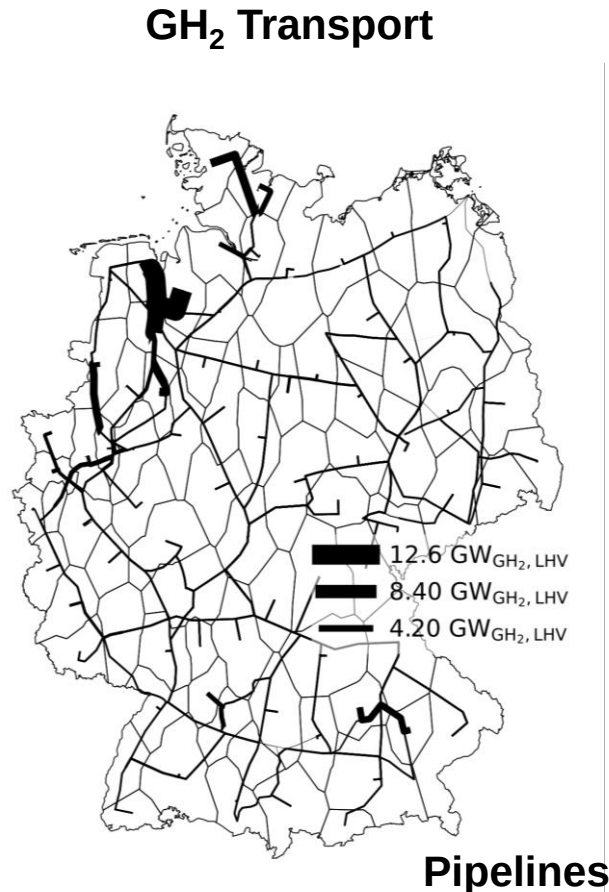
- 1/3 des Kerosin-Bedarfs wird durch LH₂ ersetzt.
- **33 TWh_{LH2}** bzw. 3 Mio. t_{LH2}/a
- Auf die Flughäfen entsprechend der jährlichen Passagiere verteilt [12, 13]

Zum Vergleich: **FCH JU** Annahmen
bis 2050 Umstellung von 40 % - 60 % des
Flugverkehrs auf LH₂ [21]

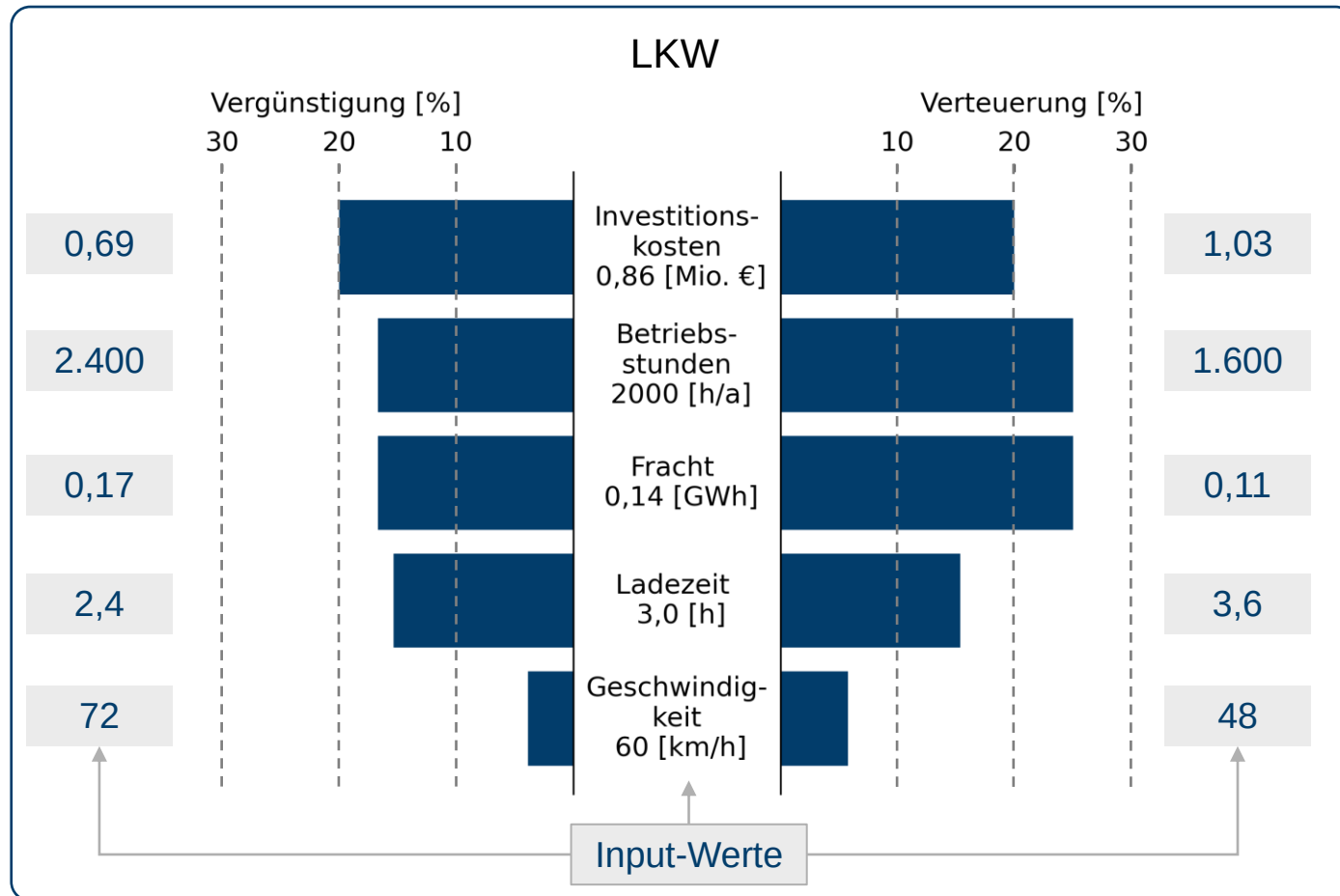


Optimierungsergebnisse zur Deckung des GH₂- und LH₂-Bedarfs

Energiemengen	TWh
Bedarf	
GH ₂	273
LH ₂	33
Import	
GH ₂	0,5
LH ₂	177
Umwandlung	
Elektrolyse	317
Regasifizierung	143
Verflüssigung	0
Transport	
Schiff	0
Bahn	34
LKW	0
Pipeline	704

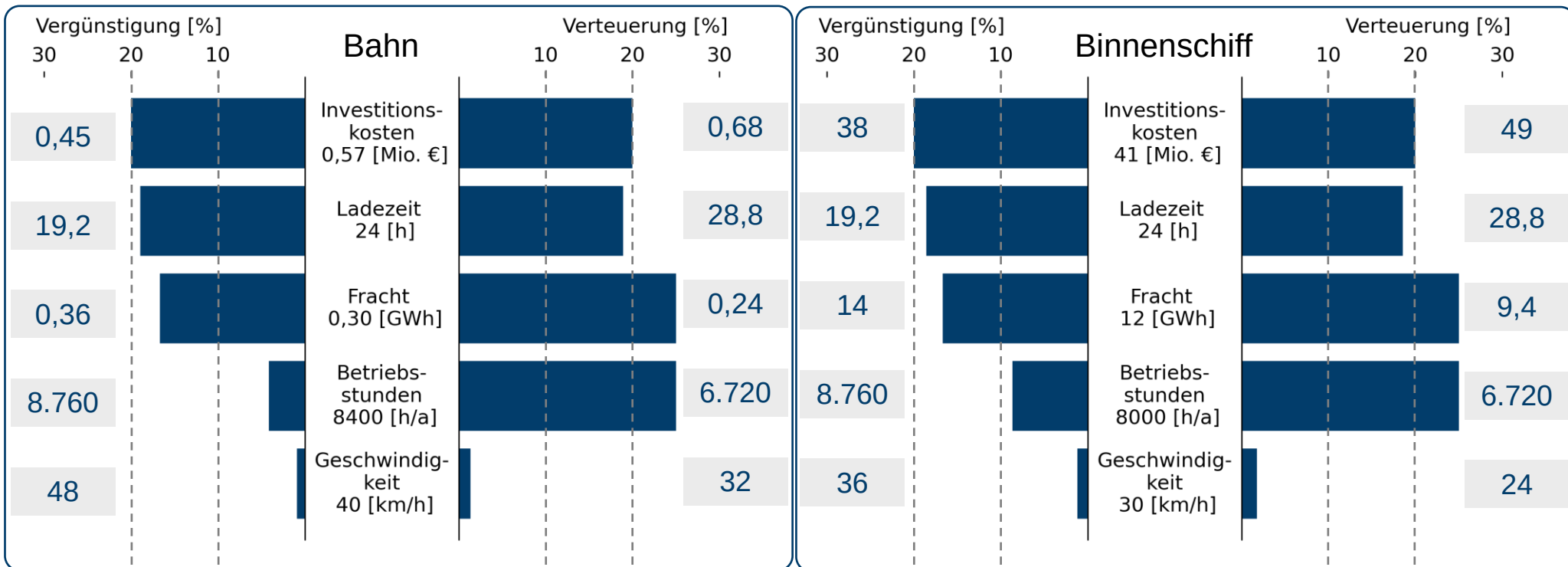


Sensitivitätsanalyse: Auswirkungen auf die spezifischen Investitionskosten durch Variation ausgewählter Input Parameter um +/- 20 %



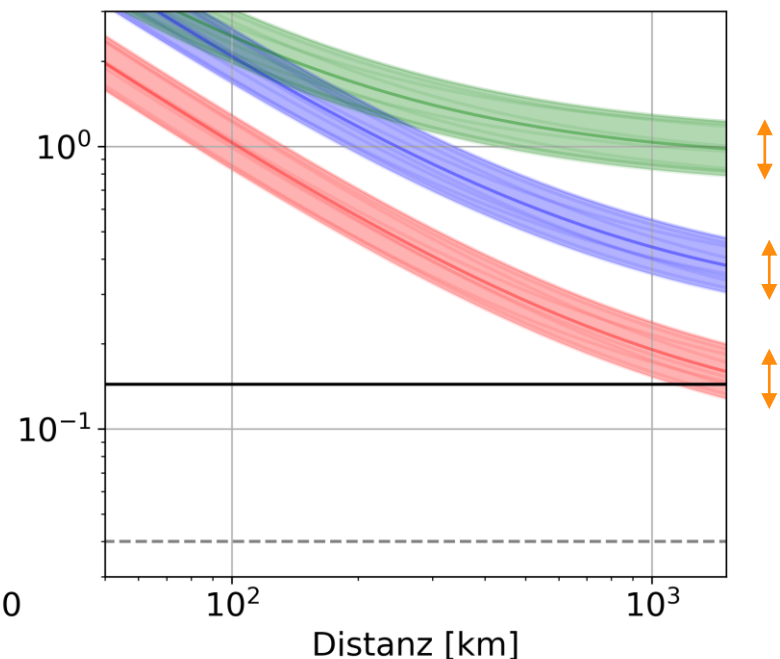
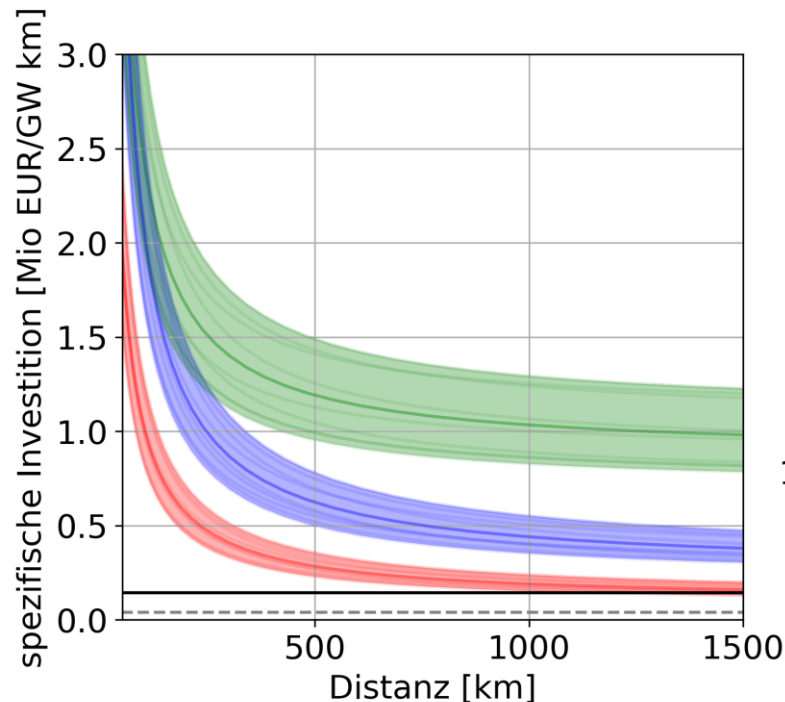
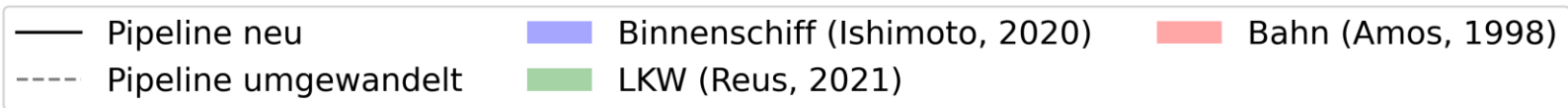
$$I_{i,j} = \frac{I_0}{C_{i,j} D_{i,j}} \quad C_{i,j} = \frac{E}{t_{\text{lade}} + \frac{2D_{i,j}}{v} + t_{\text{lade}}} \frac{T_a}{T}$$

Sensitivitätsanalyse: Auswirkungen auf die spezifischen Investitionskosten durch Variation ausgewählter Input Parameter um +/- 20 %



$$I_{i,j} = \frac{I_0}{C_{i,j} D_{i,j}} \quad C_{i,j} = \frac{E}{t_{\text{lade}} + \frac{2D_{i,j}}{v} + t_{\text{lade}}} \frac{T_a}{T}$$

Sensitivitätsanalyse: Auswirkungen auf die spezifischen Investitionskosten durch Variation ausgewählter Input Parameter um +/- 20 %



$$I_{i,j} = \frac{I_0}{C_{i,j} D_{i,j}} \quad C_{i,j} = \frac{E}{t_{\text{lade}} + \frac{2D_{i,j}}{v} + t_{\text{lade}}} \frac{T_a}{T}$$

Agenda

Motivation

Stand der Wissenschaft

Methodik und Ergebnisse

Key Takeaways

Die wichtigsten Erkenntnisse

- GH_2 -Bedarfe werden ca. zur Hälfte durch Importe gedeckt (143 /273 TWh):
→ **Importe vollständig in Form von LH_2**
- LH_2 -Importe zur Deckung von GH_2 -Bedarfen werden am Importhafen regasifiziert:
→ **Transport per Pipeline wirtschaftlichste Option**
- Gesamter LH_2 -Bedarf (33 TWh) wird durch Importe gedeckt
→ **Inländische LH_2 -Produktion nicht wirtschaftlich**
- Importiertes LH_2 wird flüssig zu LH_2 -Nachfragern transportiert
→ **Wirtschaftlichstes LH_2 -Transportmittel: Bahn**

Wasserstofftransport in flüssiger Form wirtschaftlich nur dann sinnvoll, wenn eine LH_2 -Nachfrage besteht.

Quellen

- [1] Cerniauskas S, Markewitz P, Linßen J, et al. Wissenschaftliche Begleitstudie der Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen; 2021.
- [2] Eisenbahn-Bundesamt, Phone call from March 2021
- [3] Verfondern K. Safety considerations on liquid hydrogen. Jülich: Forschungszentrum Zentralbibliothek; 2008.
- [4] Email-correspondence with Scott Nason from Chart Industries (May 2021) and Heinz-Juergen Hiller from VTG (March 2021)
- [5] Kawasaki. World's First Liquefied Hydrogen Carrier SUISEI FRONTIER Launches Building an International Hydrogen Energy Supply Chain Aimed at Carbon-free Society | Kawasaki Heavy Industries, Ltd. 2019.
https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487.
- [6] Teichmann D, Arlt W, Wasserscheid P. Liquid Organic Hydrogen Carriers as an efficient vector for the transport and storage of renewable energy. International Journal of Hydrogen Energy. 2012;37:18118–32. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.08.066.
- [7] Amos WA. Costs of Storing and Transporting Hydrogen; 1998.

Quellen

- [8] Ishimoto Y, Voldsund M, Neksa P, Roussanaly S, Berstad D, Gardarsdottir SO. Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45:32865–83. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.09.017.
- [9] Niermann M, Timmerberg S, Drünert S, Kaltschmitt M. Liquid Organic Hydrogen Carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;135:110171. doi:10.1016/j.rser.2020.110171.
- [10] Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (2020): Verkehrsnetz Bundeswasserstraßen.
- [11] DB Netz AG (2019): Strecken und Bauwerke nach INSPIRE.
- [12] Eurostat. Verkehrsnetze. 2019.
<https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/gisco/geodata/reference-data/transport-networks>.
- [13] Eurostat. Haupttabellen - Verkehr - Eurostat. 2021.
<https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/transport/data/main-tables>.
- [14] Reuß M, Dimos P, Léon A, Grube T, Robinius M, Stolten D. Hydrogen Road Transport Analysis in the Energy System: A Case Study for Germany through 2050. *Energies*. 2021;14:3166. doi:10.3390/en14113166.

Quellen

- [15] Altmann M, Gaus, Landinger, stiller, Wurster. Wasserstoffherzeugung in offshore Windparks „Killer-Kriterien“, grobe Auslegung und Kostenabschätzung; 2001.
- [16] Speicherung und Transport. In: Eichlseder H, Klell M, editors. Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden; 2008. p. 85–138. doi:10.1007/978-3-8348-9503-5_5
- [17] Welder L. Optimizing Cross-linked Infrastructure for Future Energy Systems: Optimierung von gekoppelten Infrastrukturen für zukünftige Energiesysteme: RWTH Aachen University; 2020.
- [18] Linde. H2-Distribution und -Speicherung. 2021. https://www.linde-gas.de/de/innovations/hydrogen_energy_h2/h2_one_stop_shop/h2_distribution_and_storage/index.html. Accessed 5 Aug 2021.
- [19] Reuß M, Grube T, Robinius M, Stolten D. A hydrogen supply chain with spatial resolution: Comparative analysis of infrastructure technologies in Germany. Applied Energy. 2019;247:438–53. doi:10.1016/j.apenergy.2019.04.064.
- [20] YANG C, Ogeden J. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. International Journal of Hydrogen Energy. 2007;32:268–86. doi:10.1016/j.ijhydene.2006.05.009.
- [21] Clean Sky 2 Joint Undertaking, Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, McKinsey & Company. Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2020.

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit. Lassen Sie uns in Kontakt bleiben!

✉ t.busch@fz-juelich.de

in [linkedin.com/in/toni-busch](https://www.linkedin.com/in/toni-busch)