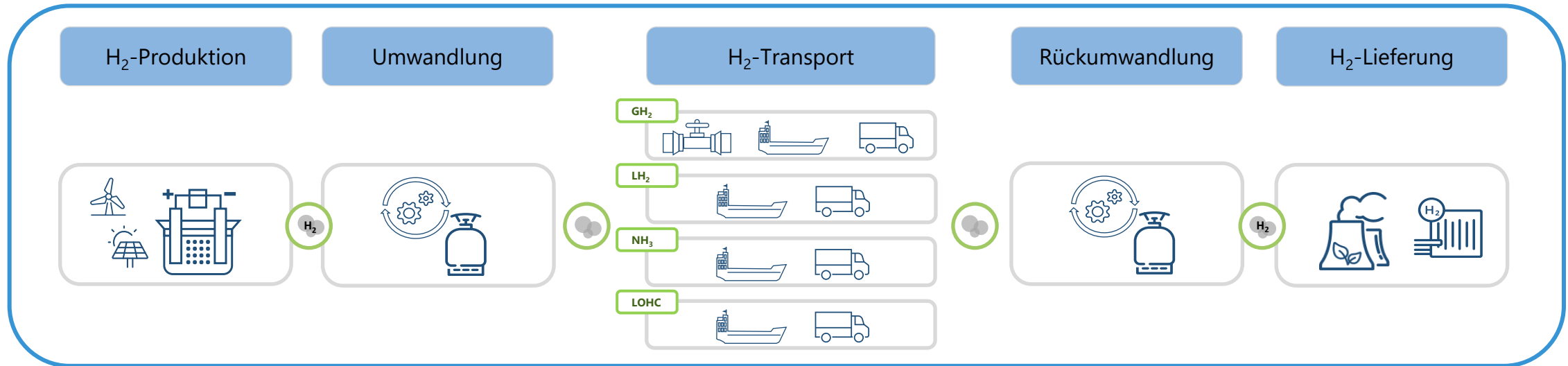


Ökobilanzen der H₂-Infrastruktur

Leon Spanagel & Anne-Marie Isbert, FfE e.V.

12.11.2024

Motivation



1. Welche **Lebenszyklusemissionen** weisen die Trägermedien auf?
2. Wo liegen die **ökologischen Hotspots**?

Ökobilanzen der H₂-Infrastruktur

1. Einführung in die Ökobilanzierung
2. Ziel und Untersuchungsrahmen
3. Ergebnisse der untersuchten Studien
4. Deep Dives: GH₂, LH₂, LOHC, NH₃

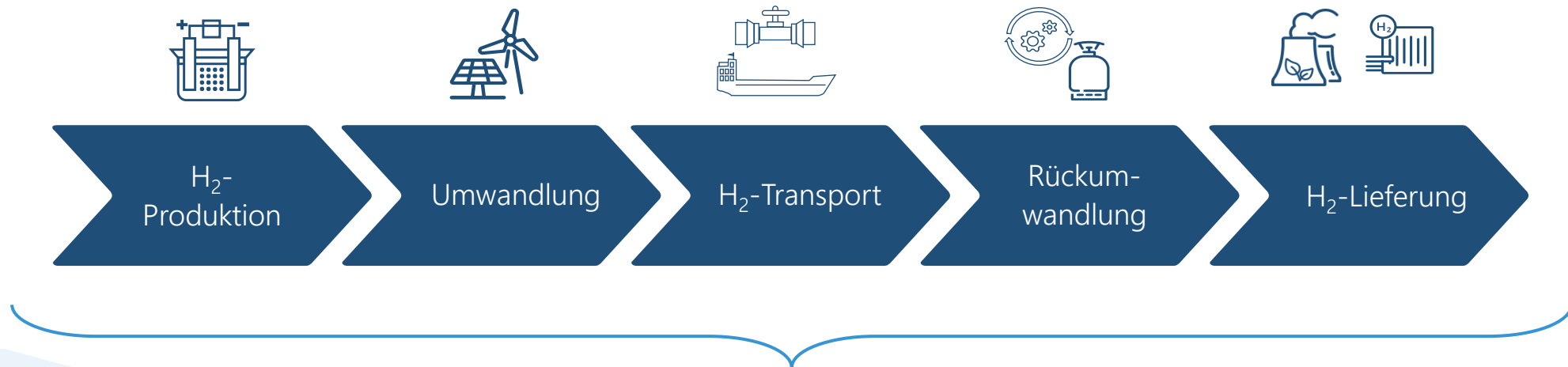


Einführung in die Ökobilanzierung

Ökobilanzen der H₂-Infrastruktur

Grundsätzliche Idee der Ökobilanz

Life Cycle Assessment – LCA nach DIN ISO 14040/44



Quantifizierung der Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus von Prozessen, Produkten oder Dienstleistungen

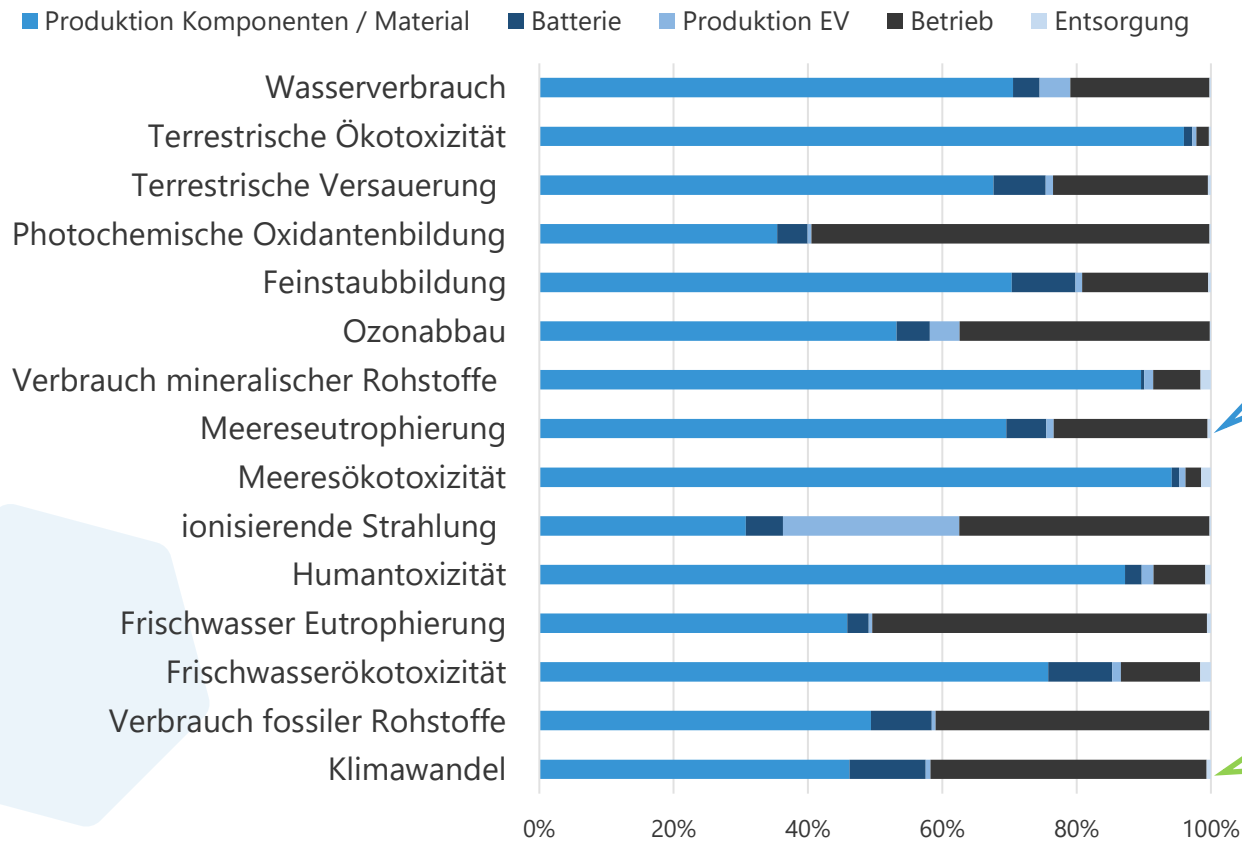
Materialflussanalyse

Quantifizierung der Inputs und Outputs jedes Prozesses



Material	Menge
Input	
Strom, Mittelspannung	54 kWh
Wasser	8,9 kg
Stahl	100 kg
...	
Output	
Wasserstoff	1 kg
Behandlung von Stahlschrott	100 kg
...	

Umweltauswirkungen, die in der Ökobilanz berücksichtigt werden können



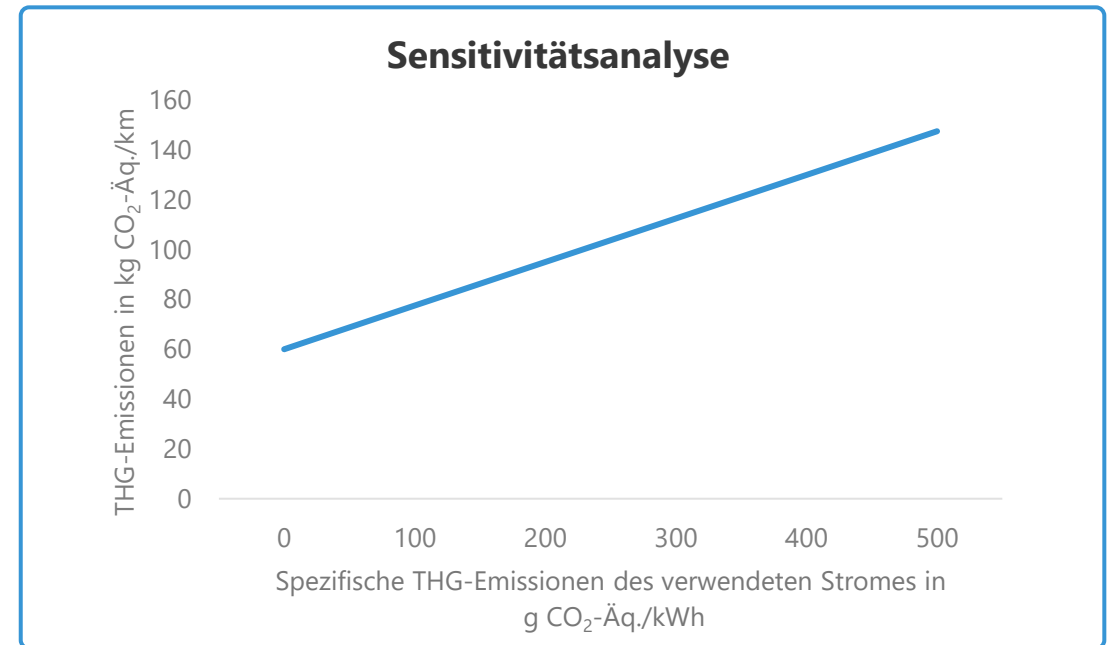
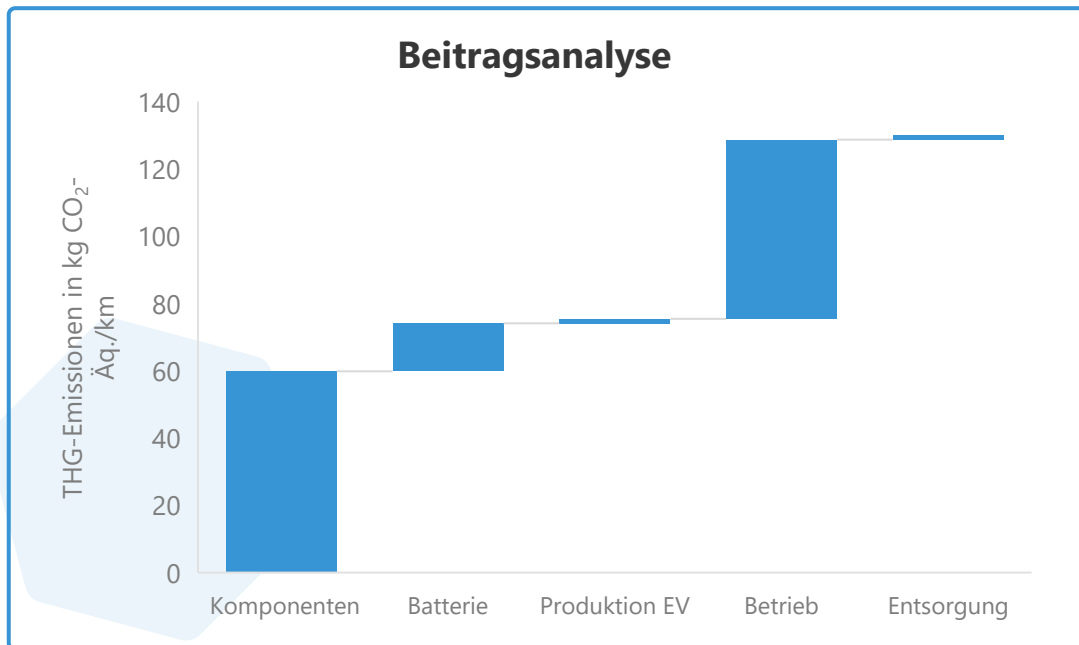
Beispiel Meereseutrophierung
 Übermäßige Zufuhr von Pflanzennährstoffen
 → Nährstoffanreicherung im Meer
 → Erhöhtes Algenwachstum
 → Abnahme der Biodiversität

Beispiel Klimawandel
 Umweltwirkungen der anthropogenen Erwärmung der Erdatmosphäre
 → Emission anthropogener THG
 → Verstärkung des Strahlungsantriebs
 → Unausgeglichene Strahlungsbilanz

Auswertung der Ökobilanzergebnisse

Beitragsanalyse und Sensitivitätsanalyse

- Identifizierungen von signifikanten Parametern (Beitragsanalyse)
- Bewertung Vollständigkeit, Konsistenz und Sensitivitätsanalysen
- Schlussfolgerungen, Beschränkungen und Empfehlungen



Ziel und Untersuchungsrahmen

Ökobilanzen der H₂-Infrastruktur

Ökobilanzen der H₂-Infrastruktur

Überblick und Ziele



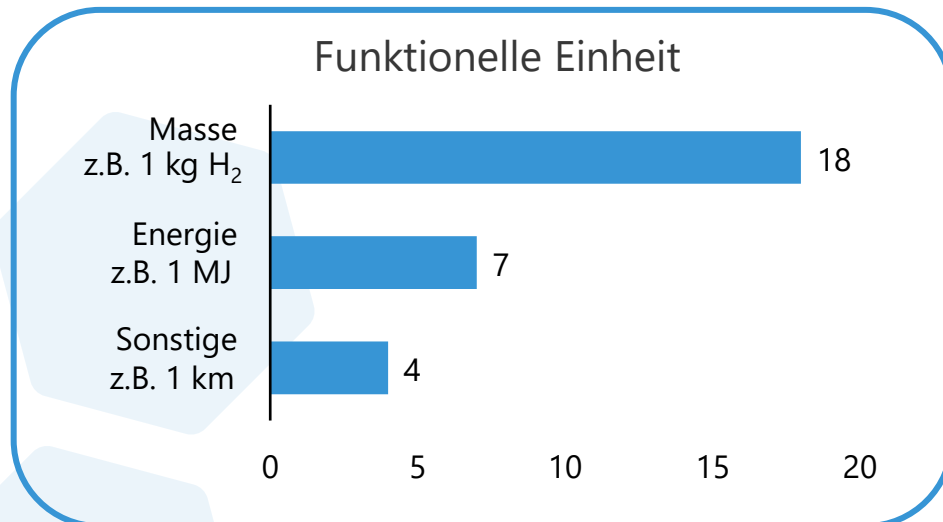
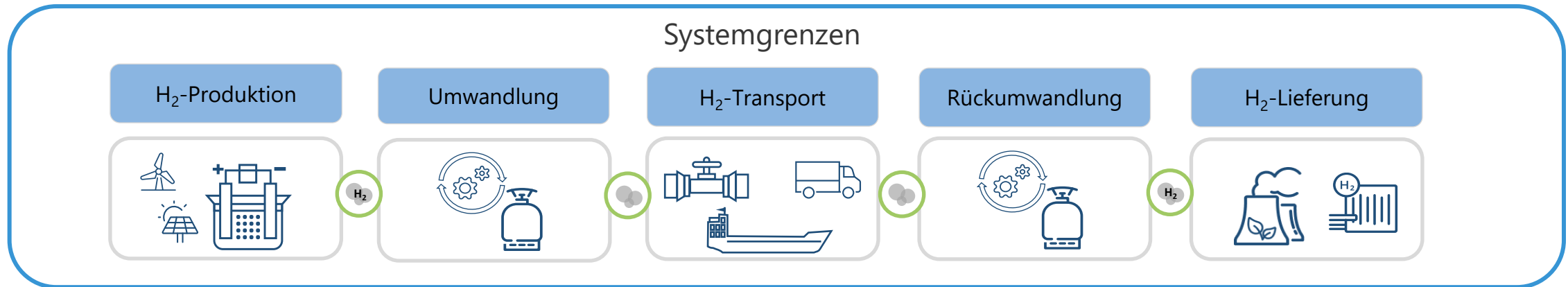
- Welche **Systemgrenzen** und **funktionelle Einheiten** werden in der Literatur betrachtet?
- Welche **THG-Emissionen** weisen die unterschiedlichen Trägermedien auf?
- Wo liegen die **ökologischen Hotspots**?
- Welche **Reduktionspotentiale** sind möglich?
- An welchen Stellen gibt es **Unsicherheiten**?
- **Nicht-Ziel:** Analyse des Einflusses der H₂-Produktion



- **Literaturrecherche** zu Ökobilanzen und THG-Bilanzen in der **H₂-Infrastruktur**
- Insgesamt **37 Studien** untersucht
- Fokus der Auswertung auf **GH₂, LH₂, LOHC und NH₃**

Untersuchungsrahmen der analysierten Studien

Systemgrenzen und funktionelle Einheit

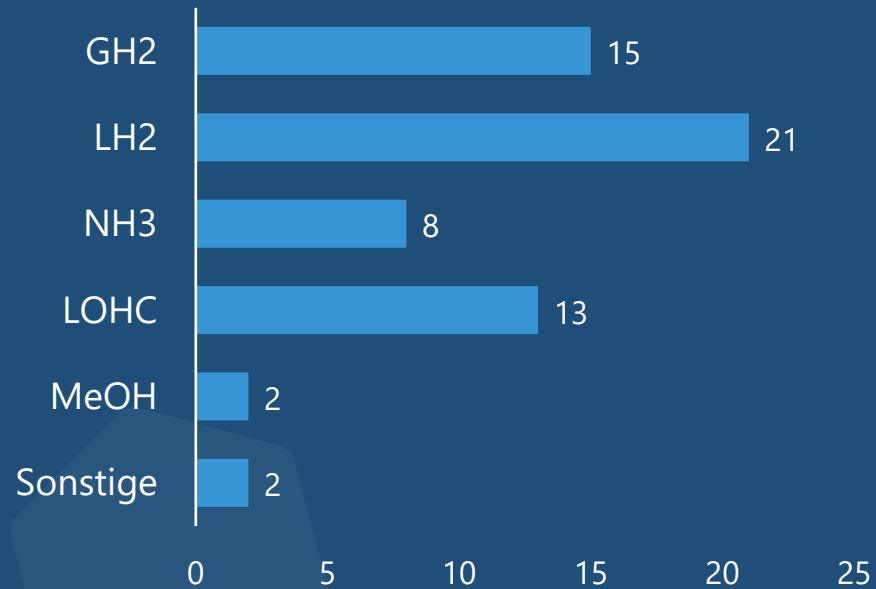


- 79 % der Studien starten mit der **H₂-Produktion**, 39 % enden mit der **H₂-Lieferung zur Endanwendung** und 36 % mit der **Rückumwandlung**
- Die funktionelle Einheit bezieht sich in 62 % der Studien auf eine Menge (i.d.R. kg) **Wasserstoff** mit bestimmter **Reinheit** und bestimmten **Druck**

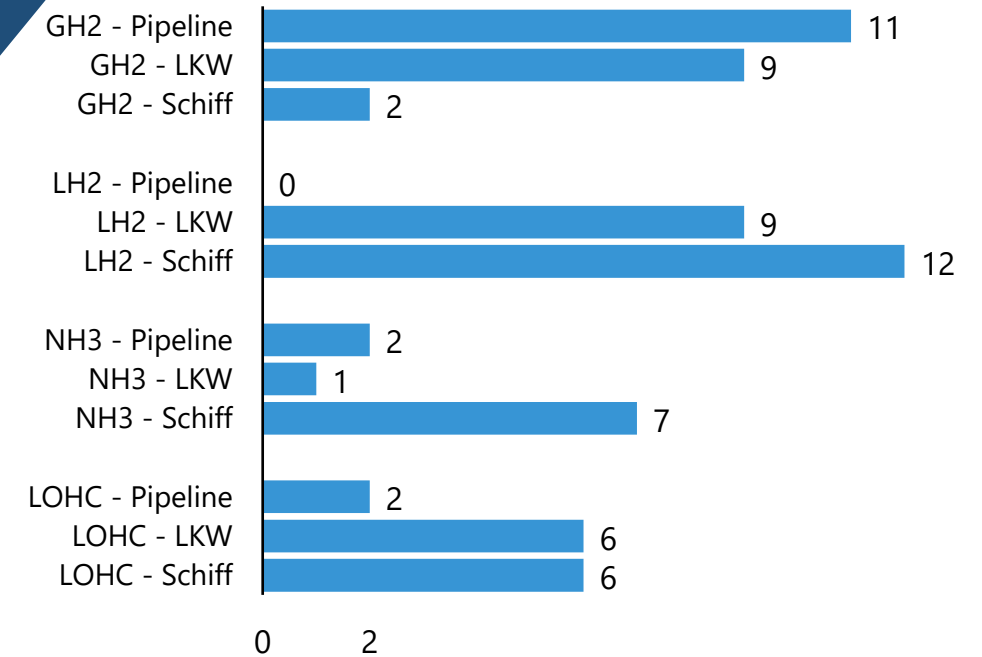
Untersuchungsrahmen der analysierten Studien

Trägermedium und Transportart

Trägermedium



Trägermedium + Transportart

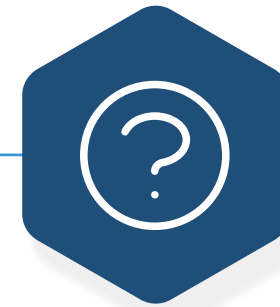


Ergebnisse der untersuchten Studien

Ökobilanzen der H₂-Infrastruktur

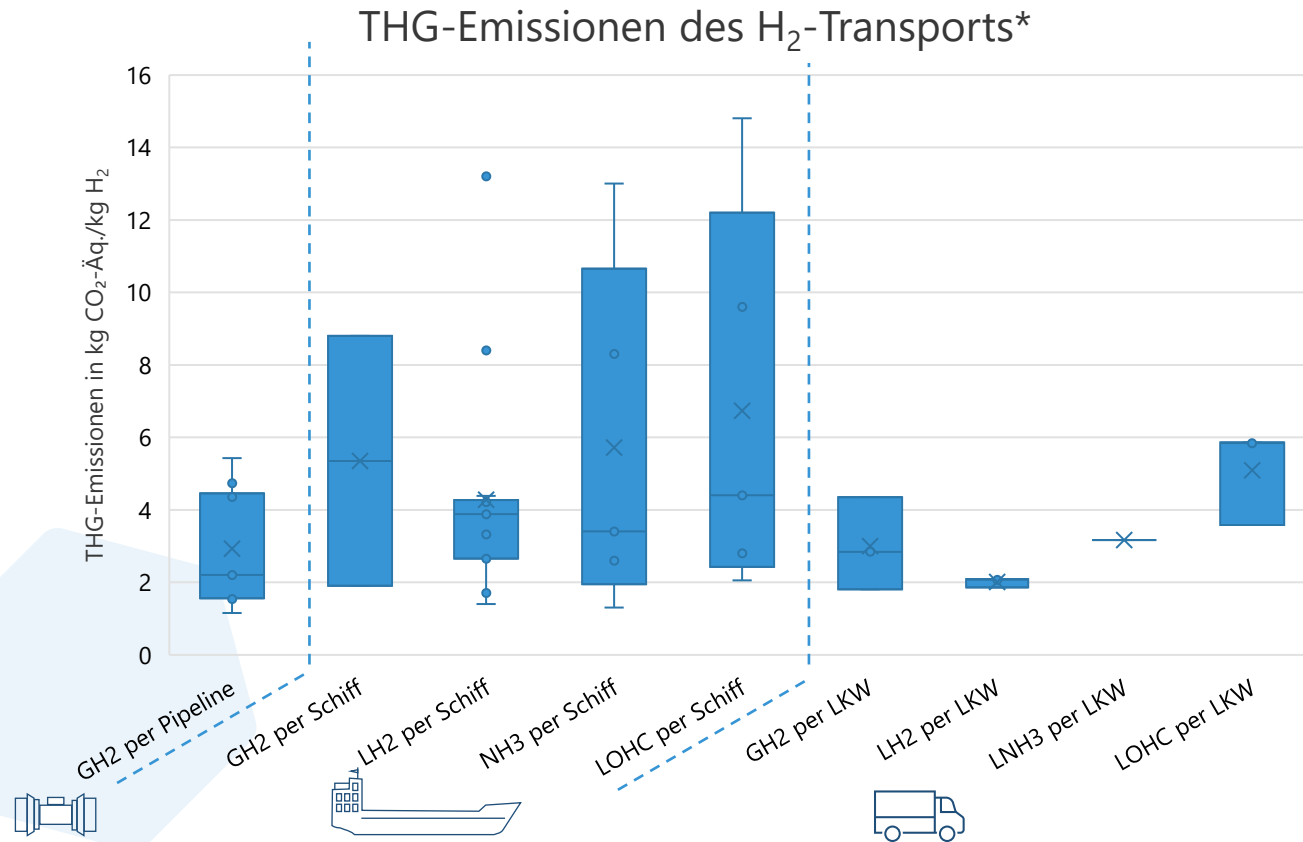
Von der Produktion grünen H₂ bis zur Rückumwandlung

Auf welche THG-Emissionen kommen die Studien im Vergleich?



Welche Transportoption ist aus ökologischer Sicht die beste?

- Antwort **nicht eindeutig**
- Stellenweise **große Spannweiten** der Ergebnisse
- **Erste Tendenzen** ableitbar



Grenzen und Unsicherheiten

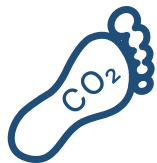
Warum sind die Spannweiten der Ökobilanz-Ergebnisse so groß?



Systemgrenzen der untersuchten Studien sind nicht identisch: Einbezug von H₂-Produktion oder H₂-Anwendung, Unterschiede in Transportdistanz, Wahl der Transportmittel, Energiemix oder funktioneller Einheit. Fokus der meisten Studien sind H₂-Produktionsverfahren und nicht auf der H₂-Infrastruktur.



Datenqualität: Die Datengrundlage der untersuchten Studien ist mit Unsicherheiten verbunden, bspw. hinsichtlich Strom- und Kraftstoffverbräuchen, Wirkungsgraden, Transportkapazitäten, Boil-Off-Raten, etc.
Mögliche Gründe: keine Primärdaten im Industriemaßstab.



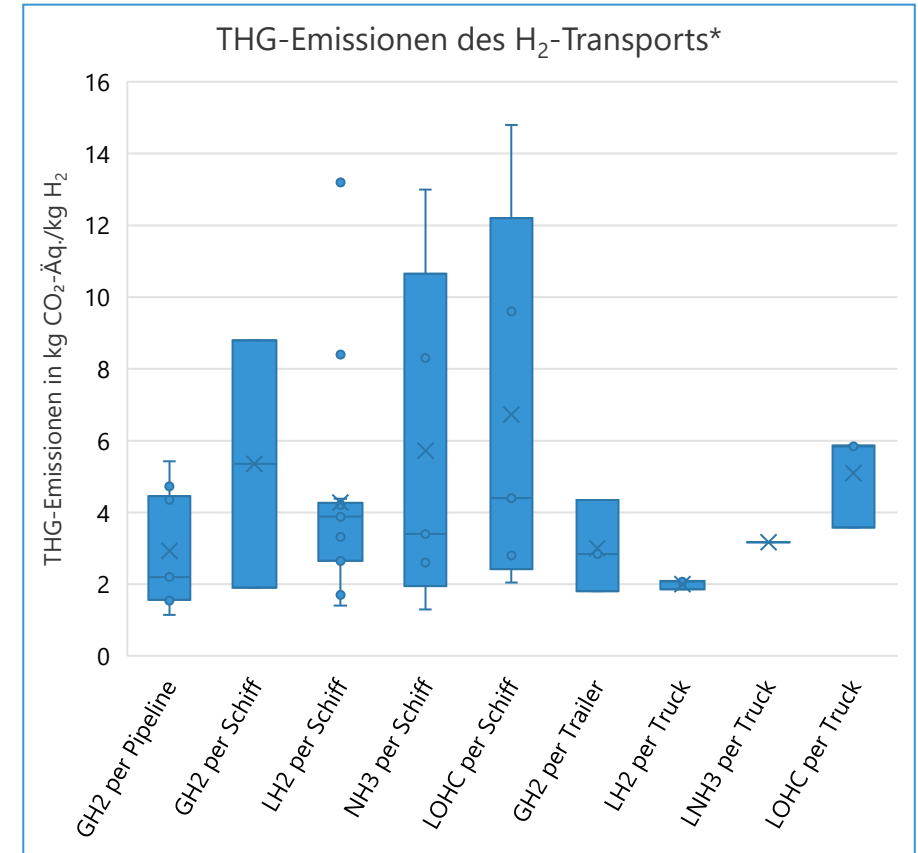
Fokus auf Treibhausgaspotential: Wirkungskategorien wie Eutrophierung oder Wasserverbrauch finden nicht immer Berücksichtigung. Soziale und ökonomische Faktoren werden in der LCA nicht betrachtet.

Ökobilanzen des H₂-Transports

Von der H₂-Produktion bis zur Rückumwandlung



- Trägermedium mit dem **geringsten ökologischen Fußabdruck** bei längeren Distanzen (>1000 km) tendenziell LH₂ (Arrigoni et al. 2024; Akhtar et al., 2021, Noh et al., 2023)
- **GH₂** mit **vergleichbar** geringen THG-Emissionen wie LH₂. Insbesondere bei kürzeren Transportdistanzen besser als LH₂ (Frank et al., 2021, Rödl et al. 2018)
- H₂-Transport mittels **chemischer Trägermedien** ist mit **höheren THG-Emissionen** verbunden (Arrigoni et al., 2024; Wulf und Zapp, 2018; Wulf et al., 2018)
- Chemische Träger unterscheiden sich nur geringfügig: NH₃ – Transport tendenziell beste Option (Arrigoni et al., 2024; Dickson et al., 2022)



Einflussfaktoren

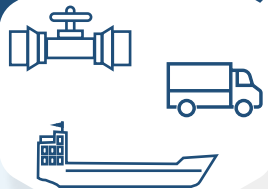
Was beeinflusst die Ergebnisse der Ökobilanz?



Strombezug: Netzbezug vs. EE-Strom



Transportdistanz: 100km – 1.500km, 1.000 – 20.000km



Transportmittel: Pipeline, Schiff und LWK

Einflussfaktor: Strombezug

1

Die Gesamtemissionen des H₂-Transports sind bei **Strombezug aus Erneuerbaren Energien geringer** als bei Bezug von Netzstrom (Noh et al., 2023; Wulf und Zapp, 2018).

2

Die Gesamtemissionen des H₂-Transports sind bei **Strombezug aus Windkraft** anstatt PV **geringer**. Grund dafür ist, dass die spezifischen Emissionen der Windenergieerzeugung im Vergleich zu Solarparks geringer sind. (Kolb et al., 2022; Hermesmann et al. 2023)

3

Einflussfaktor Strombezug ist insb. für Trägermedien relevant, die viel Energie benötigen:

- GWP für die Trägermedien LOHC & NH₃ ist bei Bezug von Netzstrom **2,4- bis 5-mal höher** als bei Strombezug aus Windkraft (Noh et al., 2023).

Einflussfaktor: Transportdistanz

1

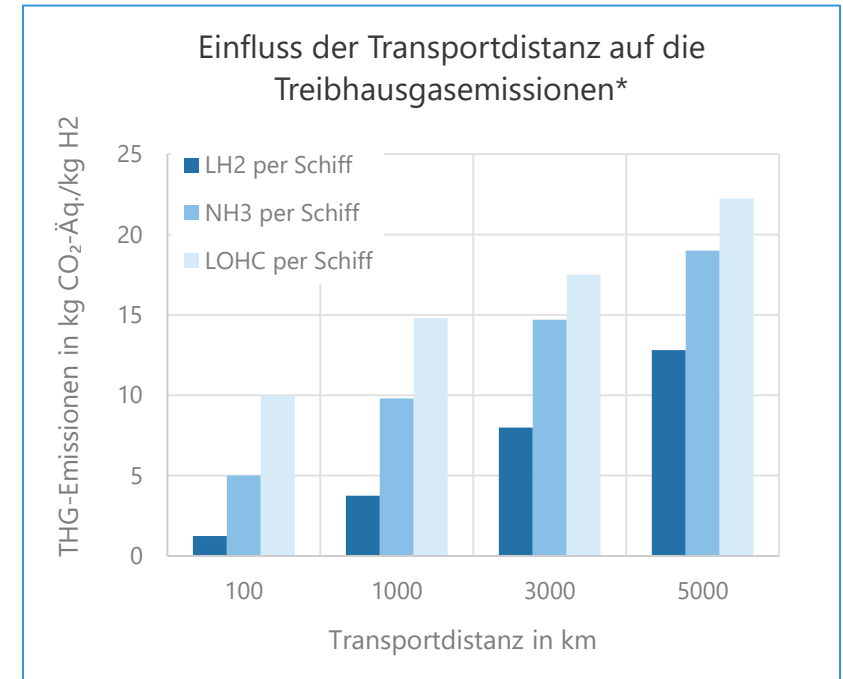
Gesamt-Emissionen steigen mit **zunehmender Transportdistanz** unabhängig von Trägermedium und Transportmittel (Wulf und Zapp, 2018; Noh et al., 2023; Frank et al., 2021; Rödl et al., 2018)

2

Ergebnisse verschiedener Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die **Entfernung** ein **wichtiger Parameter für die ökologische Nachhaltigkeit** des H₂-Imports ist (Arrigoni et al., 2024; Noh et al., 2023). In Noh et al. (2023) stammen bei einem Schiffstransport von 10.000 km unabhängig des Trägermediums mind. 73 % der THG-Emissionen aus dem Transport.

3

Bei dem Transport per LKW oder Schiff werden THG-Emissionen aus der **Verbrennung von Kraftstoffen** frei, während bei dem Transport per Pipeline die erforderliche **Rekompression** die zusätzlichen Emissionen verursacht (z.B. in Noh et al., 2023 oder Rödl et al., 2018)



Einflussfaktor: Transportdistanz 100 – 1.500 km

Transport per LKW



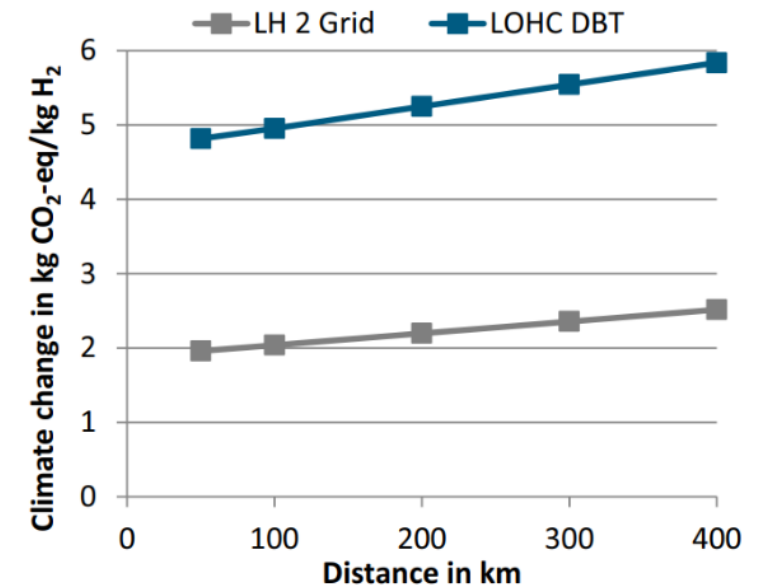
Emissionen des **LH₂-Transports** steigen aufgrund des höheren Energiegehalts langsamer an als der **GH₂-Transport** per LKW. Je **weiter die Distanz** desto sinnvoller ist die **Verflüssigung**. Bei Strecken < 1.000 km ist der gasförmige Transport umweltfreundlicher (Rödl et al., 2018; Frank et al. 2021).



LOHC-Transport ist mit **höheren Emissionen** verbunden als der **LH₂-Transport**. Mit **zunehmender Transportdistanz** vergrößert sich der Abstand, aufgrund der geringeren Transportkapazität von LOHC im LKW im Vergleich zu LH₂ (Wulf und Zapp, 2018; Akhtar et al., 2021).



Beim **LOHC-Transport** nehmen die **Transportemissionen langsamer zu** als bei **GH₂**, da die LOHC-LKWs eine größere **Transportkapazität** aufweisen (Wulf et al., 2018; Akhtar et al., 2021).



Wulf und Zapp, 2018

Einflussfaktor: Transportdistanz 100 – 1.500 km

Transportmittel: LKW vs. Pipeline

- **Transport per Pipeline** weist im Vergleich zum Transport per **LKW geringere THG-Emissionen** auf (Wulf et al., 2018; Rödl et al., 2018; Akhtar et al., 2021; Frank et al., 2021; Tayaranı und Ramkji, 2022)
- Pipelinetransport ist **unempfindlicher gegenüber der Transportdistanz**, da der **Betrieb der Kompressorstationen** im Vergleich zum Kraftstoffantrieb der LKW mit geringeren Emissionen verbunden ist (Frank et al., 2021; Rödl et al., 2018)
- Transportemissionen der Pipeline hängen neben der **Transportentfernung** auch von der **Gesamtkapazität** der Pipeline ab. **Je mehr Wasserstoff** in einer bestehenden Pipeline **transportiert** wird, **desto geringer** sind die **THG-Emissionen** pro Wasserstoffeinheit (Rödl et al., 2018).

Einflussfaktor: Transportdistanz 1.000 – 20.000 km

Transport per Schiff



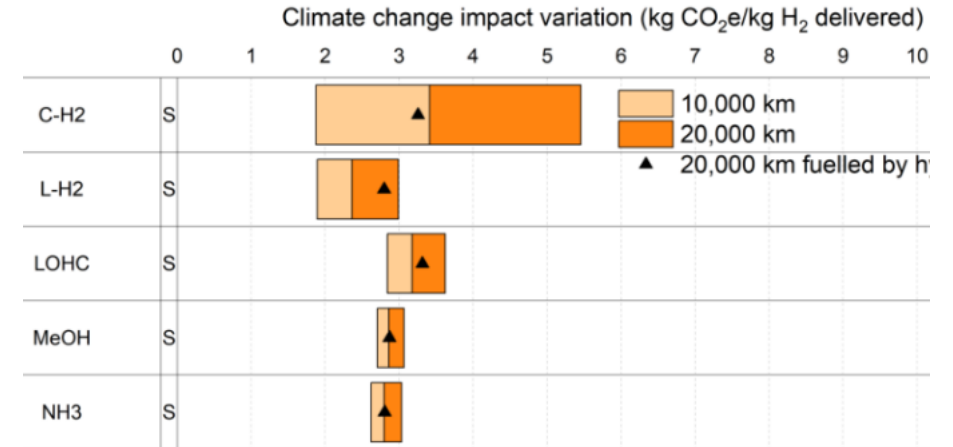
LH₂-Transport verursacht ab Distanzen von **> 1.000 km** vergleichsweise geringe Umweltauswirkungen (Arrigoni et al., 2024; Noh et al., 2023).



GH₂-Transport mit **größter Sensitivität** bei der Variation von Transportdistanzen. Über längere Transportdistanz **> 10.000 km** erweist sich **GH₂ als schlechteste Option** (Arrigoni et al., 2024; Noh et al., 2023).



Chemische Energieträger, insbesondere **NH₃**, werden mit **zunehmender Distanz attraktiver**, da weniger Energie für den Transport erforderlich ist (Arrigoni et al., 2024; Noh et al., 2023).



Arrigoni et al. (2024)

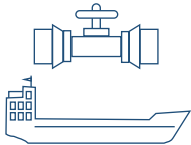
On-Site H₂-Erzeugung vs. H₂-Import

Ökobilanzen der H₂-Infrastruktur



Ökologischer Trade-off:

Ökologisch beste lokalen Bedingungen für die H₂-Erzeugung und Transportdistanz des Wasserstoffs (Hermesmann et al., 2023).



Alle Importoptionen grünen Wasserstoffs lohnen sich im Vergleich zu einer H₂-Erzeugung mit lokalem Netzstrom bzw. SMR (Arrigoni et al., 2024; Kanz et al., 2023; Kolb et al., 2022; Rödl et al., 2018; Hermesmann et al., 2023).



On-Site H₂-Erzeugung mit erneuerbaren Energien:

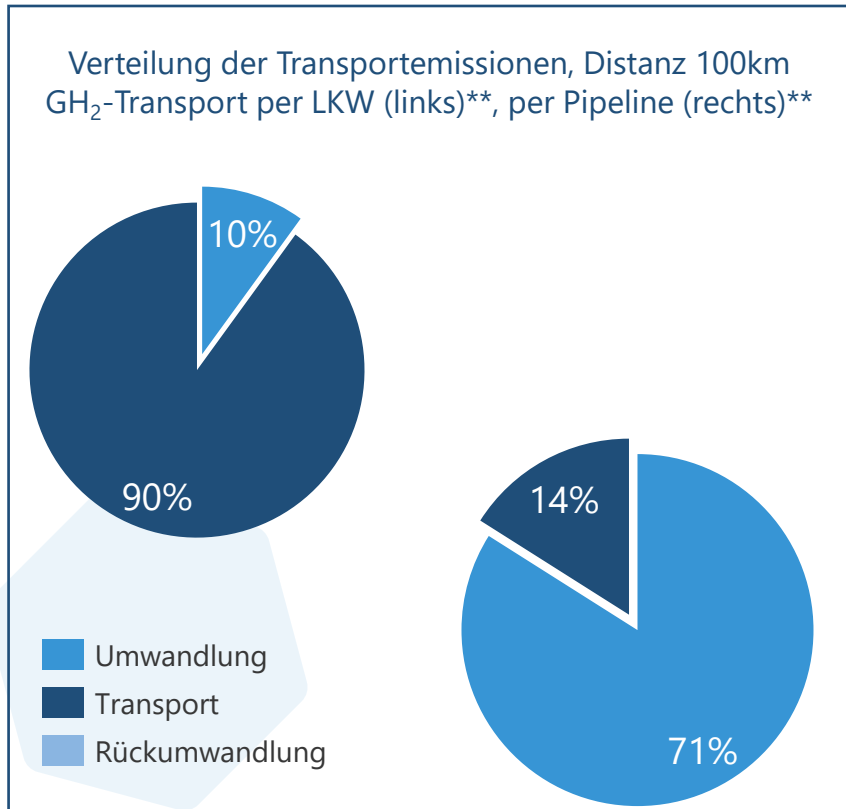
- Geringste Emissionen unabhängig ob Strombezug aus PV oder Windkraft (Arrigoni et al., 2024; Kanz et al., 2023, Rödl et al., 2018; Hermesmann et al. 2023)
- Kolb et al. (2022) widersprechen teilweise, insb. bei Import von LH₂ aus Regionen mit hohen EE-Erträgen.

Deep Dives: GH_2 , LH_2 , LOHC , NH_3

Ökobilanzen der H_2 -Infrastruktur

GH₂-Transport

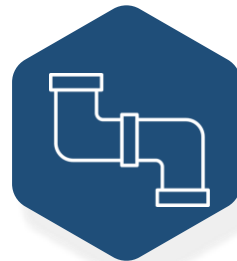
Hotspots & Reduktionspotentiale



Vergleichsweise* **geringe Gesamtemissionen** (Akhtar et al., 2021)



Hotspot LKW: Transportemissionen, insb. beeinflusst durch die angenommene Transportdistanz (Wulf et al., 2018; Akhtar et al., 2021)



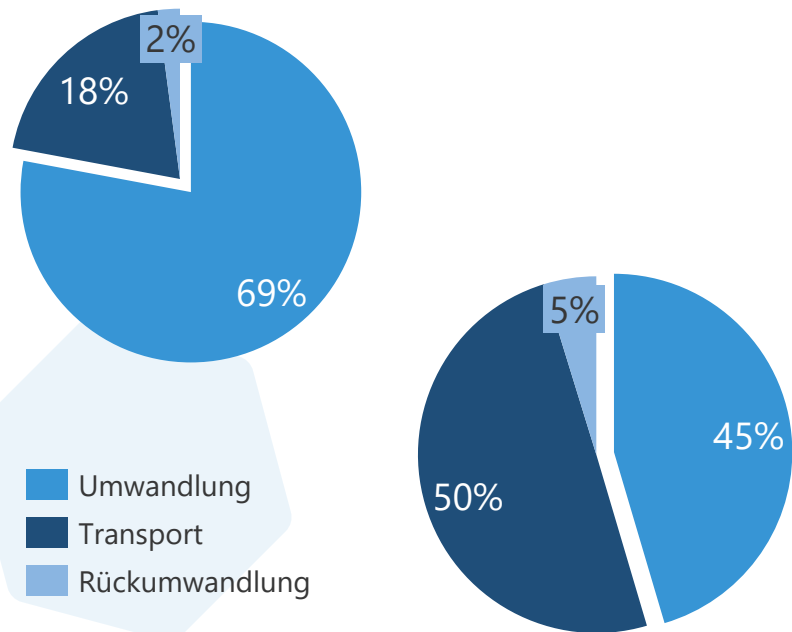
Hotspot Pipeline: Betrieb der **Kompressorstationen** – Einspeise- und Transportverdichtung (Akhtar et al. 2021; Hermesmann et al., 2023; Rödl et al., 2018)

- Je höher die Transportmenge, desto geringer die spezifischen Emissionen (Akhtar et al., 2021; Rödl et al., 2018)
- **Umweltfreundlicher GH₂-Transport:** Einspeise- und Transportverdichtung über EE-Strom (Hermesmann et al., 2023)

LH₂-Transport

Hotspots & Reduktionspotentiale

Verteilung der Transportemissionen, Distanz 100km
LH₂-Transport per LKW (links)*, per Schiff (rechts)**



Hotspot: Energieintensive Verflüssigung des Wasserstoffs, hohe Emissionen insbesondere verursacht durch die Verwendung von **fossilem Netzstrom** (Kudoh et al. 2018; Kolb et al., 2021).

- Nutzung von **Strom aus Windkraft** (anstatt Netzstrom) für die Verflüssigung kann zu einer Reduktion der Gesamtemissionen um 17,9 % beitragen (Wulf und Zapp, 2018).

Einflussfaktor: Transport - Ausmaß abhängig von **Transportdistanz** und **Transportmittel** (Kolb et al., 2021).

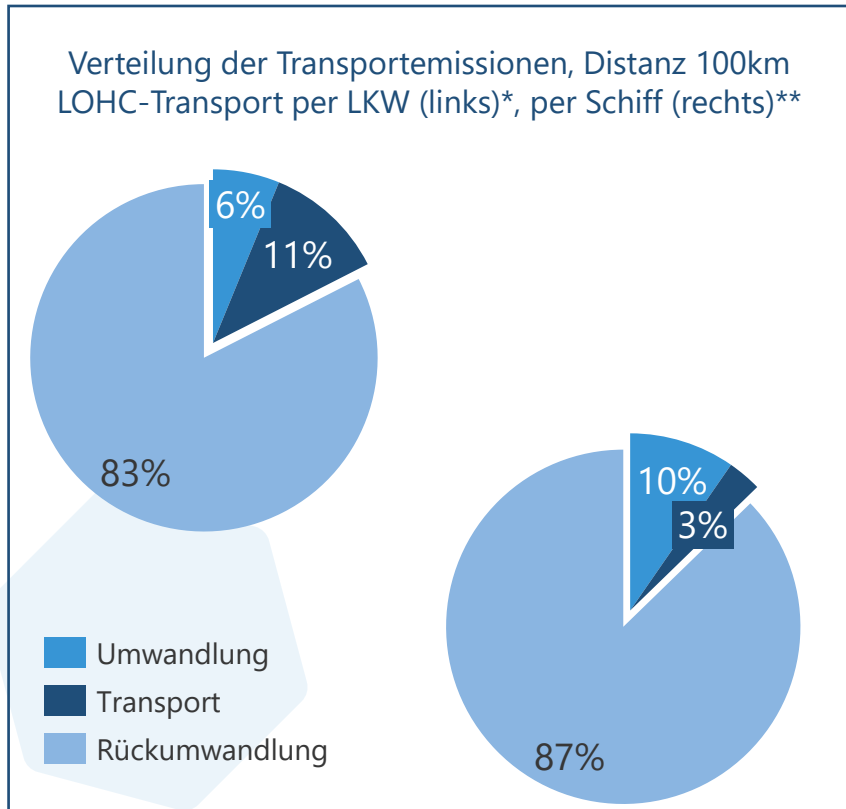
- Schifftransport: Nutzung von **Boil-Off Gas für den Antrieb** (an Stelle von Schweröl), ohne dass direkte Emissionen resultieren, weist ein Reduktionspotential von 63.3–88.6 % der Gesamtemissionen auf (Kolb et al., 2021).

Indirekte Emissionen durch entweichendes **Boil-Off Gas** in die Atmosphäre, insb. bei der Verflüssigung & Transport (Arrigoni et al., 2024; Akhtar et al., 2021; Kanz et al., 2023)).

- Annahmen zu Boil-Off Raten in den LCA-Analysen zwischen 0,2 – 1,1 %/Tag (Arrigoni et al., 2024; Noh et al., 2023; Ozawa et al., 2017; Al-Breiki and Bicer, 2020)

LOHC-Transport

Hotspots & Reduktionspotentiale



Hotspot: Wärmebedarf der **Dehydrierung**, welcher große Mengen an THG-Emissionen verursacht, da der Wärmebedarf durch Erdgas gedeckt wird (Arrigoni et al., 2024; Akhtar et al., 2021; Wulf und Zapp, 2018; Wulf et al., 2018).

- Anteil an **Gesamtemissionen** ca. 41-64 % bzw. an Transportemissionen ca. 83 %-87 % (Akhtar et al., 2021; Noh et al., 2023 – Transportdistanz jeweils 100km)



Einflussfaktoren: Transportdistanz & Kraftstoffwahl

Mit steigenden Transportdistanzen nimmt der Anteil des Transports (somit auch die Kraftstoffwahl) an den Gesamtemissionen zu (Noh et al., 2023).

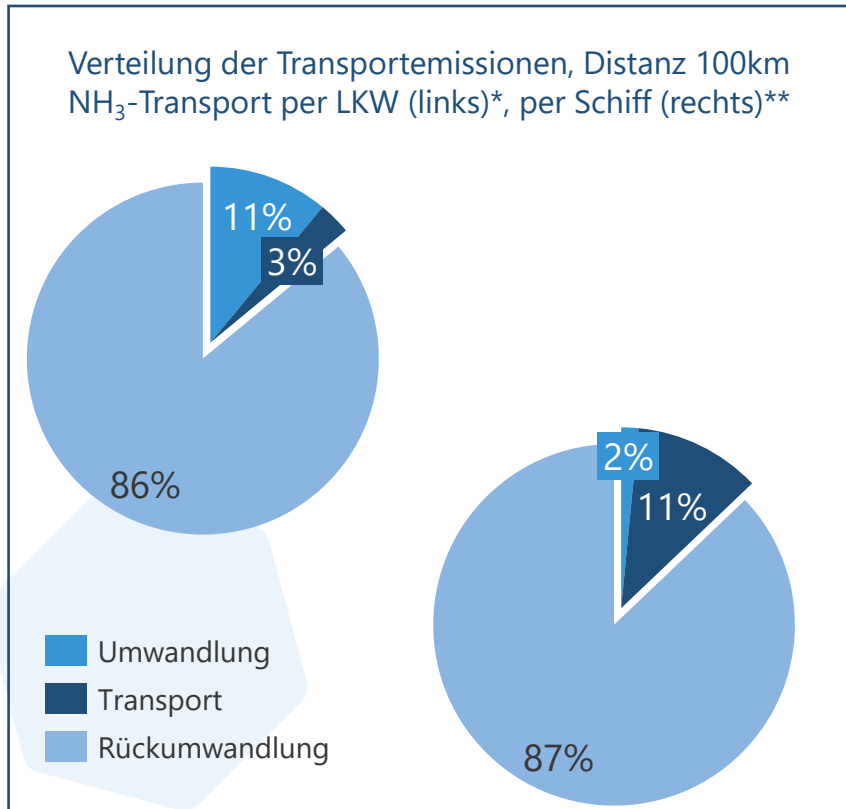


Reduktionspotential:

Verwendung eines Teils des transportierten **Wasserstoffs** (anstelle von Erdgas) für die Dehydrierung kann zu einer **Reduktion der Gesamtemissionen um 35-40 %** beitragen (Akhtar et al., 2021; Wulf und Zapp, 2018).

NH₃-Transport

Hotspots & Reduktionspotentiale



Hotspot: Ammoniak-Cracking (Rückumwandlung in H₂)

- Ca. 37.6-43.7 % Anteil an Gesamtemissionen bzw. ca 86-87 % an Transportemissionen insb. auf Grund der benötigten Energie zur Erreichung der hohen Reaktionstemperaturen (Akhktar et al., 2021; Noh et al., 2023 - Transportdistanz 100km).
- Auch Anteile an Gesamtemissionen bis zu 91% möglich (Dickson et al., 2022).



Einflussfaktoren: Transportdistanz & Kraftstoffwahl

Mit steigender Transportdistanz, nimmt der Einfluss des Transports (somit auch die Kraftstoffwahl) auf die Gesamtemissionen zu (Noh et al., 2023).



Reduktionspotential:

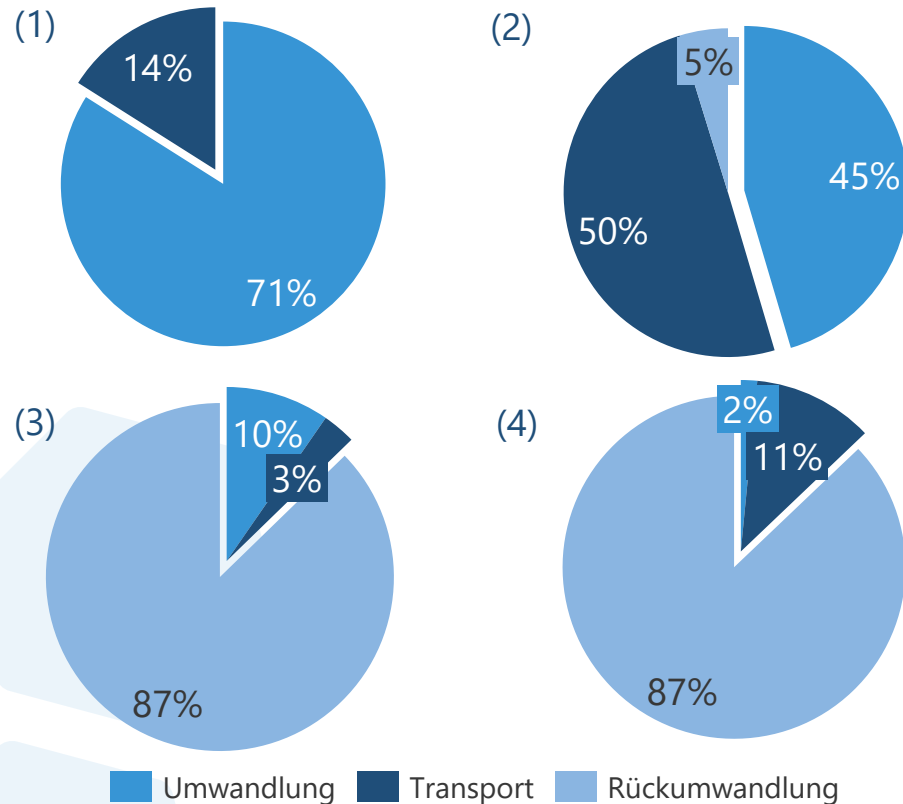
Direkte Nutzung des Ammoniaks (ohne Rückumwandlung) kann zu einer Reduktion der Gesamtemissionen um 13.5 % (Dickson et al. 2022) bzw. bis zu 49 % führen. (Akhktar et al. 2021)

Deep Dives: GH₂, LH₂, LOHC, NH₃

In a Nutshell

Verteilung der Transportemissionen, Distanz 100km

(1) GH₂ per Pipeline, (2) LH₂ per Schiff,
(3) LOHC per Schiff, (4) NH₃ per Schiff



- **Hotspots** unterscheiden sich je nach Trägermedium, insb. verursacht durch energieintensive Umwandlungs- oder Rückumwandlungsschritte.
- Hohe **Reduktionspotentiale** (<50%) laut Literatur.

Fazit und Ausblick



- **LH₂** und **GH₂** sind diejenigen Trägermedien mit dem **geringsten ökologischen Fußabdruck**.
- Transport mittels **chemischer Trägermedien** ist mit **höheren THG-Emissionen** verbunden – es existieren jedoch hohe Reduktionspotentiale.
- **Hotspots** unterscheiden sich je nach Trägermedium, insb. verursacht durch energieintensive Umwandlungs- oder Rückumwandlungsschritte.



- Die Gesamtemissionen des H₂-Transports sind bei **Strombezug aus EE** (insb. aus Windkraft) **geringer** als bei Netzbezug.
- Die Gesamtemissionen **steigen mit zunehmender Transportdistanz** unabhängig von Trägermedium und Transportmittel.



- Umweltwirkungen des H₂-Transports unterscheiden sich in der Literatur insb. auf Grund unterschiedlicher **Systemgrenzen** und **Datenqualität**.
- **Einzelfallbetrachtungen** sind wesentlich für die Entscheidungsfindung.

Kontakt



ANNE-MARIE ISBERT

Senior Research Associate
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.

+49(0)89 15 81 21-33

AISBERT@FFE.DE



LEON SPANAGEL

Research Consultant
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V..

+49(0)89 15 81 21-73

LSPANAGEL@FFE.DE

Ffe
Am Blütenanger 71
80995 München

