

WASSERSTOFFTRANSPORT AUF DER SCHIENE KANN SICH LOHNEN

Gastbeitrag von Tobias Bregulla und Christian Kittler

Die Verwendung von (grünem) Wasserstoff in zahlreichen Industriesektoren ist für die Erreichung der Treibhausgasneutralität bis 2050 eine wichtige Stellschraube. Bei der Betrachtung der verschiedenen Transportmöglichkeiten von Wasserstoff kann grundsätzlich festgestellt werden, dass die Eisenbahn sich aufgrund geringer technologischer und regulatorischer Hürden hierfür eignen würde. Dies wird auch durch die Tatsache unterstützt, dass Wasserstoff erst durch Verdichtung wirtschaftlich transportabel wird.

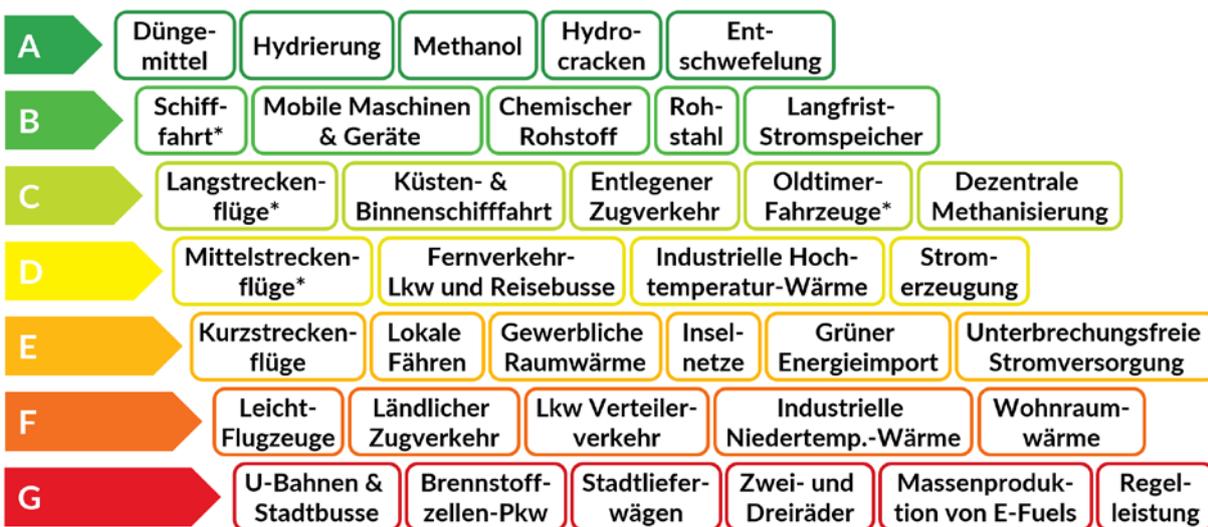
WANDEL DER ENERGIEBEREITSTELLUNG

Erklärtes Ziel der Europäischen Union ist die Treibhausgasneutralität bis 2050. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund des hohen Pro-Kopf Primärenergiebedarfs der EU-28 Staaten ein ambitioniertes Vorhaben. Im Jahr 2021 benötigten in Europa lebende Personen im Vergleich zur Weltbevölkerung Pro-Kopf nahezu doppelt so viel Primärenergie.¹ 72 % dieser Primärenergie wurden im Jahr 2016 durch die Energieträger Öl, Gas und Kohle bereitgestellt.² Dies sind Energieträger, bei deren Nutzung zwangsläufig CO₂-Emissionen entstehen. Ein weiterer Aspekt ist, dass im Jahr 2020 in der EU 58 % der verfügbaren Energien durch Importe bereitgestellt wurden.³ Dabei spielen fossile Energieträger aufgrund ihrer Transportierbarkeit eine wesentliche Rolle. Mit Blick auf das Ziel der Treibhaus-

Einsatzbereiche sauberen Wasserstoffs

(Schätzungen, nach Michael Liebreich, 2021)

Alternativlos



Unwirtschaftlich

* Sehr wahrscheinlich in Form von mittels Wasserstoff erzeugten E-Fuels oder Ammoniak.

Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Einsatzbereiche für sauberen Wasserstoff

GRAFIK: GREGOR HAGEDORN, WOLF-PETER SCHILL & MARTIN KITTEL, BASED ON MICHAEL LIEBREICH/LIEBREICH ASSOCIATES, CLEAN HYDROGEN LADDER, VERSION 4, 2021, CONCEPT CREDIT: ADRIAN HILL ENERGY CITIES
 Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Horvath & Patzelt GmbH und TU Dresden / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

gasneutralität müssen diese zukünftig abgelöst werden. Parallel zum Ausbau lokaler erneuerbarer Erzeuger, die den Bedarf an Energieimporten reduzieren können, spielt somit der Import treibhausgasneutraler Energieträger eine wesentliche Rolle in der zukünftigen Energieversorgung der EU. Wasserstoff kann dabei als Schnittstelle dienen und die energetisch hochwertige, aber schwer speicherbare Elektroenergie in die stoffliche Welt überführen und umgekehrt. Dadurch können logistische Vorteile erzielt und neue Märkte erschlossen werden.

Die Schiene bietet sich bereits heute aufgrund des niedrigen spezifischen Energiebedarfs als leistungsfähiges Transportmittel für Massengüter an Land an. Die Betrachtung dieses Transportmittels hinsichtlich der Eignung für Wasserstoff erscheint vor diesem Hintergrund sowohl logisch als auch notwendig.

TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN ZUM WASSERSTOFFTRANSPORT

Der für die Energiespeicherung relevante Heizwert von Wasserstoff beträgt mit ca. 33 kWh/kg das Dreifache des Wertes von Dieselmotorkraftstoff (ca. 12 kWh/kg)^{6,7}. Diese zunächst vorteilhaft erscheinende Eigenschaft stellt allerdings mit der geringen Dichte von nur 90 g/m³ unter Normdruck eine Herausforderung für Lagerung und Transport dar. Die technischen Lösungen, mit denen dem begegnet werden kann, basieren im Wesentlichen auf einer Erhöhung des Drucks (LH₂), der Verflüssigung (GH₂) oder einer weiteren stofflichen Verbindung (LOHC, Synthetisierte Stoffe etc.).

Es ist erwartbar, dass die unterschiedlichen Umwandlungen verlustbehaftet sind. Während für eine Verdichtung von 1 bar auf 300 bar bzw. 700 bar 8 bis 12 % des Energieinhalts benötigt werden, ist für eine Verflüssigung ein energetischer Aufwand von bis zu 30 % erforderlich.⁸ Erschwerend kommt hinzu, dass der verdichtete bzw. verflüssigte Energieträger besondere Anforderungen an die verwendeten Tanks hinsichtlich des Drucks und der Temperaturisolation stellt. Dies führt dazu,

1 bp Statistical Review of World Energy 2022, 71. Edition

2 IEA World Energy Balances database © OECD/IEA 2018, www.iea.org/statistics

3 <https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/how-dependent-are-eu-member-states-on-energy-imports/>

4 M. Liebreich, The Clean Hydrogen Ladder [Now updated to V4.1], <https://www.linkedin.com/pulse/clean-hydrogen-ladder-v40-michael-liebreich/>, 2022

5 BMWi, Die Nationale Wasserstoffstrategie, S. 6, 2020

6 M. Sterner, I. Stadler, Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration, Springer, 2019

7 J. Töpfer, J. Lehmann, Wasserstoff und Brennstoffzelle, Springer, 2017

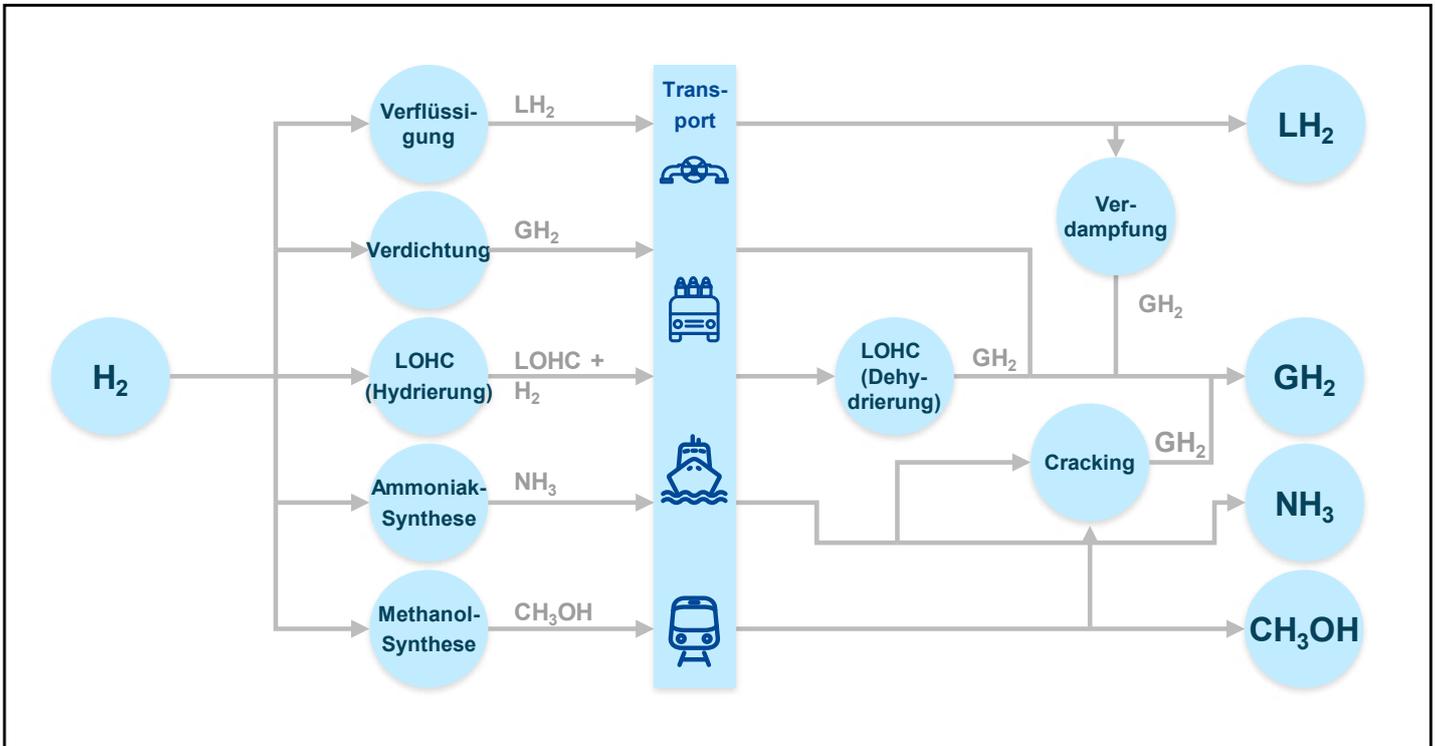
8 Dr. Ulf Bossel, Die Rolle des Wasserstoffs in einer nachhaltig geführten Energiewirtschaft, European Fuel Cell Forum

dass eine Vielzahl an Transportformen erforderlich ist, um den jeweiligen spezifischen Anforderungen (Mengen und Entfernungen) wirtschaftlich gerecht zu werden.

Aufgrund der mitteleuropäischen Siedlungs- und Industriestruktur kann erwartet werden, dass Energieimporte

WASSERSTOFFBEDARF

Die Quantifizierung des zu erwartenden Wasserstoffbedarfs in Deutschland und der EU ist eine komplexe Aufgabe, die zum aktuellen Zeitpunkt noch zahlreichen politischen und wirtschaftlichen Unsicherheiten unterliegt. Hierbei geht es überwiegend um die Frage, in welchen Bereichen der Einsatz des Energieträgers gefördert wird und wie sich die aktuellen Kostenstrukturen entwickeln werden. Dies führt dazu, dass heute allenfalls eine Abschätzung getroffen werden kann. Michael Liebreich verglich in „The Clean Hydrogen Ladder, V4.1“ den Energieträger Wasserstoff treffend mit einem Schweizer Taschenmesser: „Das Problem ist nur, dass man Wasserstoff, genau wie ein Schweizer Taschenmesser, nicht für alles verwenden wird, was man theoretisch damit machen könnte.“⁴ Damit wird auf die Wirtschaftlichkeit von sauberem Wasserstoff in unterschiedlichen Einsatzbereichen hingewiesen. Kernaussage ist dabei, dass Bereiche, die alternativlos auf (grünen) Wasserstoff angewiesen sein werden, mit jenen konkurrieren, für die Alternativen bestehen. Da sich zum heutigen Zeitpunkt nicht zweifelsfrei prognostizieren lässt, welche der angegebenen Bereiche in Zukunft Wasserstoffbedarf entwickeln oder auf Alternativen zurückgreifen werden, ist eine Prognose nur mit großem Streuungsbereich und unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Umsetzungsszenarien möglich. Die Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung bezifferte im Jahr 2022 den Bedarf für Deutschland im Jahr 2030 auf 90 bis 110 TWh Wasserstoff. Dies entspricht einer stofflichen Menge von 2,7 bis 3,3 Mio. t. Bereits heute wird davon ausgegangen, dass diese Menge „nicht nur mit der lokalen Erzeugung von grünem Wasserstoff bedient werden kann.“⁵ Dies verdeutlicht, dass auch in Zukunft ein Energieimport und damit ein Transportbedürfnis notwendig sein werden.



GRAFIK: EVELTY GMBH

Transportmöglichkeiten von Wasserstoff

aus energiereichen Ländern erfolgen müssen. Diese sind typischerweise über mittlere bis weite Entfernungen erreichbar. Hierfür sieht die Internationale Agentur für Erneuerbare Energien (IRENA) im Wesentlichen Pipelines, Trägerstoffe (LOHC), Flüssigwasserstoff und Ammoniak vor.⁹

Aufgrund der zu erwartenden Importmengen werden neben Pipelines maßgeblich Hochseeschiffe für den Transport der jeweiligen Stoffe zum Einsatz kommen. Dabei wird aber auch der Eisenbahn eine wesentliche Rolle zukommen, da einerseits eine Hinterlandanbindung der Seehäfen erfolgen muss und andererseits auch intereuropäische Verkehre abzuwickeln sein werden.

WASSERSTOFFTRANSPORT AUF DER SCHIENE

Die zuvor genannten Transportmöglichkeiten weisen hierbei verschiedene wirtschaftliche Eigenschaften auf. Über Pipelines können große Mengen Wasserstoff über lange Distanzen wirtschaftlich transportiert werden, wobei der Ausbaustand des europäischen Wasserstoffpipeline-Netzes derzeit noch sehr gering ist. Der Transport mittels Binnenschiffen bedingt eben-

falls Mindestmengen zur wirtschaftlichen Nutzung der Ladekapazitäten sowie eine oftmals nicht gegebene Anbindung der Endabnehmer an Wasserstraßen. Der Einsatz von Lkw ist maßgeblich für den Transport von geringen Mengen Wasserstoff auf kurzen Distanzen wirtschaftlich sinnvoll und eignet sich daher vor allem für die letzte Meile und die Verteilung in der Fläche. Der Verkehrsträger Eisenbahn ist als vierte Transportmöglichkeit für Wasserstoff dahingehend aussichtsreich, als dass auf ein bereits großflächig ausgebautes Schienennetz zurückgegriffen werden kann. Potenzielle Endkunden benötigen hierfür einen betriebsfähigen Gleisanschluss. Falls dieser nicht vorhanden ist, erfolgt die Bedienung der „letzten Meile“ per Lkw.

Aus diesem Grund müssen lediglich Investitionen an der Transportquelle (Verdichtung und Übergabe) und der Transport-

⁹ IRENA, Global hydrogen trade to meet the 1,5°C climate goal - Part II, 2022

¹⁰ Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz <https://blog.lea-hessen.de/wp-content/uploads/2020/08/Potenzialbeschreibung-Wasserstofftransport-%C3%BCber-das-Schienennetz.pdf>, S. 26 f., 2020

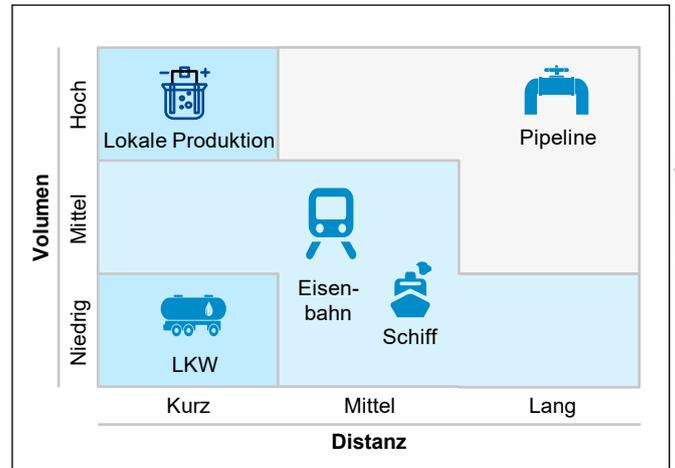
¹¹ <https://gueterwagenkatalog.dbcargo.com/katalog/nach-gattung/Lgns-581-5852672>

senke (Aufnahme, ggf. Verdichtung und Speicherung) getätigt werden, während Investitionen in das bestehende Schienennetz speziell für diesen Transport größtenteils nicht notwendig sind.

Wasserstoff stellt zwar ein stofflich leichtes Gut dar, ist aber nur gemeinsam mit einem speziellen Tank transportierbar. Dieser kann, beispielsweise im Falle eines Typ-4-Tanks, die zwanzigfache Masse des Wasserstoffs annehmen – ein weniger problematischer Umstand als das dabei eingenommene Volumen. Eine beispielhafte Untersuchung zum Wasserstofftransport auf der Schiene verwendete einen Flachwagen des Typs „Lgns581“, welcher einen 40-Fuß Standardcontainer mit einer Masse von 26,6 t aufnehmen kann. Dieser besitzt ein Fassungsvermögen von 1108 kg Wasserstoff bei 500 bar.¹⁰ Die sich daraus ergebende Achslast liegt mit knapp 20 t unterhalb der zulässigen Achslasten für die meisten Hauptbahnen in Deutschland.¹¹ Auch bei vergleichbaren Lkw für den Wasserstofftransport wird deutlich, dass das Volumen das begrenzende Maß darstellt. Diese können, zumindest bei gasförmigem Wasserstoff, unter Ausnutzung der für Straßenfahrzeuge geltenden geometrischen Begrenzungen, Wasserstoffmengen von ca. 1 t mitführen – auch hier nur ein Bruchteil des Fahrzeuggesamtgewichts. Es ist somit erwartbar, dass die Wagenlänge als maßgebliche Begrenzung der Transportmenge in das Volumen einfließen wird.

¹² Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz <https://blog.lea-hessen.de/wp-content/uploads/2020/08/Potenzialbeschreibung-Wasserstofftransport-%C3%BCber-das-Schienennetz.pdf>, S. 19, 2020

¹³ Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz <https://blog.lea-hessen.de/wp-content/uploads/2020/08/Potenzialbeschreibung-Wasserstofftransport-%C3%BCber-das-Schienennetz.pdf>, S. 47, 2020



Geeignete Transportmittel zum Transport von Wasserstoff

Der Verkehrsträger Eisenbahn als solcher eignet sich aufgrund der zulässigen Radsatzlasten und der maximal zulässigen Zuglängen grundsätzlich für den Transport von masseintensiven Gütern mit hohem Volumen. Dennoch kann bei Betrachtung der Transportmengen die Wirtschaftlichkeit des zumindest gasförmigen Transports in Frage gestellt werden. Dies lässt auch den Transport von Wasserstoffträgern, die ein deutlich geringeres Volumen einnehmen, in den Vordergrund rücken.

Wir bringen Ihre Güter auf die Schiene.

Besuchen Sie uns:
transport logistic
 9.-12. Mai 2023, München
 Freigelände, Gleis 3/1



vtg.com

Was auf der Schiene möglich ist? Ob gekühlte Produkte oder saisonale Nachfragespitzen: Wir haben für jedes Ihrer Güter die passenden Waggons, Aufbauten und Tankcontainer sowie zahlreiche ergänzende Leistungen – von Schienenlogistik über Flottenservices bis hin zu Digitallösungen.

Sprechen Sie uns an, gerne erstellen wir für Ihren Transportbedarf ein maßgeschneidertes Angebot!



TRANSPORT FOR LIFE



Die Betrachtung der regulatorischen Rahmenbedingungen für den Transport von Wasserstoff auf der Schiene stellt in Deutschland keine Herausforderung dar. So sind lediglich die üblichen Rahmenbedingungen des Gefahrgutbeförderungsgesetzes anzuwenden. Die Transportzeiten beim Wasserstofftransport auf der Schiene sind jedoch aufgrund der Priorisierung des Personenverkehrs in Deutschland länger im direkten Vergleich zum Transport mittels Lkw.¹² Aufgrund der Lagerfähigkeit des Wasserstoffes sind jedoch in der Regel keine zeitkritischen Transporte notwendig, weshalb dieser Nachteil eine geringe Bedeutung hat.

WIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNG

Wird die Schiene als Verkehrsträger für den Wasserstofftransport in Betracht gezogen, sind neben den technischen Bedingungen auch mehrere wirtschaftliche Faktoren wie z. B. Trassengebühren, Personalkosten oder Containerkosten zu berücksichtigen. In einer Potenzialbeschreibung des Landes Hessen wurden die Kosten von Wasserstofftransporten auf der Schiene und auf der Straße anhand mehrerer Szenarien verglichen. So belaufen sich exemplarisch die Kosten für eine 39 km lange Zugstrecke auf 1,74 EUR/kg H₂ (Container: 500 bar MECG Langtyp Sggrss733), während die gleiche Strecke mit dem Lkw 31 km lang ist und sich die Transportkosten hierbei auf 1,51 EUR/kg H₂ belaufen.¹³ Grundsätzlich stellen die Autoren der Potenzialbeschreibung fest, dass die H₂-Transportkosten bei 500 bar zwischen Lkw und Schienentransport annähernd identisch sind. Die Kosten können jedoch in Abhängigkeit von vielen Faktoren wie z. B. Containertyp, Menge oder Strecke variieren.

Zudem sind die höheren negativen externen Effekte des Lkw wie Lärm oder CO₂-Ausstoß möglicherweise Gegenstand steigender Bepreisungen in der nahen Zukunft, während der emissionsärmere Verkehrsträger Eisenbahn im Gegenzug mit weiteren gezielten staatlichen Subventionen rechnen kann. In der Potenzialbeschreibung des Landes Hessen wurde ermittelt, dass der Energiebedarf für den Schienentransport eines Gascontainers („MEGC“) ca. 40 % geringer ist und somit der CO₂-Ausstoß ebenfalls geringer ausfällt als im Straßentransport.¹⁴ Die politischen Ambitionen, den Schienengüterverkehr (SGV) zu stärken, werden u. a. im Masterplan Schienengüter-

verkehr des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr sichtbar, indem beispielsweise bereits seit dem 13. November 2020 die Finanzierung der Entgelte in Serviceeinrichtungen des SGV mit dem Schwerpunkt Einzelwagenverkehr mit 80 Mio. EUR unterstützt wird.¹⁵

AUSBLICK

Die Notwendigkeit von Crackern bei Trägerstoffen wie bspw. LOHC bedingt, dass für den Schienentransport vor allem Hub-Lösungen anstelle von Punkt-zu-Punkt-Lösungen einzusetzen sind, wodurch der Transport erst bei größeren Mengen an Wasserstoff wirtschaftlich wird. Unter Berücksichtigung der politischen Ambitionen, den umweltfreundlicheren SGV zu fördern, ist eine Verschiebung der Kostenvorteile zugunsten der Eisenbahn jedoch zukünftig nicht auszuschließen. Sollten externe Effekte wie z. B. Lärm oder Feinstaubbelastungen weiter durch den Staat internalisiert werden, würden somit die Kosten pro Kilometer auf der Straße steigen, womit der Transport über die Schiene zukünftig wirtschaftlich noch attraktiver sein wird. Für ein stabiles Wasserstofftransportnetz wird der SGV daher höchstwahrscheinlich mittel- bis langfristig eine bedeutende Rolle in Ergänzung zu den Verkehrsträgern Lkw und Schiff sowie Pipeline einnehmen. =

Autoren: Dipl.-Ing. Tobias Bregulla ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Elektrische Bahnen der TU Dresden, und Christian Kittler, M.Sc. ist als Managing Consultant bei der Horváth & Partner GmbH tätig.

¹⁴ Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz <https://blog.lea-hessen.de/wp-content/uploads/2020/08/Potenzialbeschreibung-Wasserstofftransport-%C3%BCber-das-Schienennetz.pdf>, S. 52, 2020

¹⁵ Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Anlagenpreisförderung im Schienengüterverkehr BMDV - Anlagenpreisförderung im Schienengüterverkehr (bund.de) 2023