



Institut für
Seeverkehrswirtschaft
und Logistik



POTENZIALE CONTAINERISIERTER WASSERSTOFFTRANSPORTE

Potenziale containerisierter Wasserstofftransporte für die
Versorgung von Verbrauchern zur Erreichung der Klima-
ziele in Bremerhaven



www.isl.org

Kontakt

Universitätsallee 11/13
28359 Bremen
Deutschland
Tel.: +49 421 22096-0

www.isl.org

Autoren

Dr. Nils Meyer-Larsen
E-Mail: meyer-larsen@isl.org
Tel.: +49 471 309838-53

Matthias Dreyer
E-Mail: dreyer@isl.org
Tel.: +49 471 309838-18

gefördert durch

BIS Bremerhavener Gesellschaft für Investi-
tionsförderung und Stadtentwicklung

© Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik ISL

Alle Inhalte dieses Werkes, insbesondere Texte, Tabellen und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Das Urheberrecht liegt, soweit nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, beim ISL. Jede Art der Vervielfältigung, Verbreitung, öffentlichen Zugänglichmachung oder andere Nutzung bedarf der ausdrücklichen, schriftlichen Zustimmung des ISL.

Satz und Layout: ISL

Bremen, Mai 2024

Die Projektausgaben bezogene Zuwendung wird aus Mitteln des Landes Bremen im Rahmen des Landesprogramms „Förderung der angewandten Umweltforschung“ (AUF) der Senatorin für Umwelt, Klima und Wissenschaft der Freien Hansestadt Bremen finanziert.

Inhalt

1. Einleitung	6
2. Technik	8
2.1 Technische Voraussetzungen containerisierter Transporte von Druckwasserstoff	8
2.2 Hersteller von Wasserstoffcontainern	9
3. Regularien	11
3.1 Rechtliche Voraussetzungen containerisierter Transporte von Druckwasserstoff	11
3.2 Möglichkeiten bzw. Barrieren für den Seetransport	14
3.3 Regulatorik containerisierter Wasserstofftransporte im Vor- und Nachlauf	15
4. Logistikkonzepte	15
4.1 Beteiligte	16
4.2 Ketten containerisierter Wasserstofftransporte	16
5. Ökonomie	22
5.1 Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	22
5.1.1 Betrachtungszeitraum	22
5.1.2 H ₂ -Produktion	23
5.1.3 H ₂ -Containerkosten	23
5.1.4 H ₂ -Containertyp	24
5.1.5 H ₂ -Transportkosten	25
5.1.6 H ₂ -Handling beim Verbraucher	29
5.1.7 H ₂ -Kosten für Verbraucher	29
5.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	30
5.3 Kosten entlang der Transportkette	35
5.4 Perspektiven hinsichtlich Kosten, Produktionskapazitäten und Gewicht von Wasserstoffcontainern	35
6. Möglichkeiten und Grenzen von H₂-Containern	36
6.1 Stärken und Schwächen des Einsatzes von H ₂ -Container	36
6.2 Transport und Umschlag großer Mengen von Wasserstoffcontainern	37
6.3 Bedeutung von Wasserstoffcontainern für die Versorgungssicherheit	38

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übernahme internationaler Regelwerke in nationales Recht	12
Abbildung 2: Lkw-Transporte zum Exportterminal	17
Abbildung 3: Bahntransporte zum Exportterminal mit Gleisanschluss	18
Abbildung 4: Bahntransporte zum Exportterminal ohne Gleisanschluss	18
Abbildung 5: Seetransport vom Ex- zum Importterminal	19
Abbildung 6: Seetransport mit Transshipmentbewegung	19
Abbildung 7: Nachlauf bis zum Verbraucher mit dem Lkw	20
Abbildung 8: Nachlauf bis zum Verbraucher mit der Bahn	20
Abbildung 9: Nachlauf bis zum Verbraucher mit dem Binnenschiff	21
Abbildung 10: Transportkette voller H ₂ -Container vom Produzenten zum Verbraucher	21
Abbildung 11: Transportkette leerer H ₂ -Container vom Verbraucher zum Produzenten	22
Abbildung 12: H ₂ -Kostenentwicklung abhängig vom Bedarf (Relation Bremerhaven/Bergen)	30
Abbildung 13: Kosten pro kg Wasserstoff je H ₂ -Containertyp (Relation Bremerhaven/Bergen)	31
Abbildung 14: Kostenanteile pro kg Wasserstoff je H ₂ -Containertyp (Relation Bremerhaven/Bergen)	32
Abbildung 15: Vergleich der Referenzhäfen	33
Abbildung 16: Vergleich der Referenzhäfen mit Kostenanteilen H ₂ -Beschaffung, H ₂ -Container, H ₂ -Transport	34
Abbildung 17: Kosten entlang der Transportkette Relation Bremerhaven/Bergen	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Angebotene H ₂ -Containertypen	10
Tabelle 2: Wasserstoffinhalt pro Containertyp	10
Tabelle 3: Zertifikate	13
Tabelle 4: Gesamtgewicht pro Containertyp	13
Tabelle 5: H ₂ -Beschaffungskosten	23
Tabelle 6: Wasserstoffinhalt der betrachteten H ₂ -Container	24
Tabelle 7: Wasserstoffinhalt der betrachteten H ₂ -Containertypen	25
Tabelle 8: Ausgewählte Referenzhäfen	26
Tabelle 9: Referenzhäfen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung	27
Tabelle 10: Rundreisen der Referenzhäfen	44

1. Einleitung

Vor dem Hintergrund der Energiewende zeigt sich in der aktuellen Situation, mit sukzessiver Abschaltung von Kohle- und Atomkraftwerken und Lieferengpässen beim Erdgas verbunden mit der Gaspreisentwicklung, die sowohl ökologische als auch ökonomische Notwendigkeit, unabhängig(er) von fossilen Brennstoffen zu werden. Blauer bzw. grüner Wasserstoff sind eine gute Möglichkeit, diese Unabhängigkeit voranzubringen. Die dafür erforderliche Neuausrichtung betrifft Bereiche wie die industrielle Produktion, die Versorgung von Wohn- und Gewerbequartieren mit Blockheizkraftwerken (BHKW), die Errichtung von Wasserstoff-Tankstellen sowie Logistikanwendungen und Forschungsvorhaben. Blauer Wasserstoff ist in diesem Zusammenhang als eine Übergangslösung hin zu grünem Wasserstoff zu sehen. Es werden unter anderem von Ländern, Häfen, Regionen und Unternehmen vielfältige Konzepte und Pläne entwickelt, am Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft teilzuhaben. Auch im Land Bremen und speziell am Standort Bremerhaven gibt es Projekte, mit denen dieses Potenzial erschlossen wird.

Der Übergang zur Klimaneutralität wird in Deutschland in erheblichem Maße Importe von grünem Wasserstoff erfordern. Dabei kann der Wasserstoff per Pipeline oder Schiff importiert werden. Mit dem Aufbau des European Hydrogen Backbone (Sagdur, 2023) wird ein Pipelinenetz aufgebaut. An das Netz werden zunächst Großverbraucher angeschlossen. Weitere Verbraucher könnten dann nach und nach angeschlossen werden. Existierende Erdgaspipelines können umgerüstet werden – es wird mit einer Realisierungszeit von drei bis fünf Jahren gerechnet. Für einen Neubau einer Wasserstoffpipeline ist von bis zu zehn Jahren auszugehen. Importe per Schiff sind daher eine wichtige Alternative. (Agora Industrie und TU Hamburg, 2023)

Für den Transport von Druckwasserstoff in seiner reinen Form als Massengut existieren derzeit allerdings weder Schiffe noch Umschlags- bzw. Lagermöglichkeiten in ausreichender Skalierung. Würde Wasserstoff mit Gastankern transportiert, müsste am exportierenden Hafen eine entsprechende Menge an Wasserstoff verfügbar sein, um die Tanker ohne Zeitverlust befüllen zu können; so muss der Wasserstoff entweder im Hafen selbst erzeugt oder in einer vorgelagerten Transportkette zum Exporthafen gebracht und dort zwischengelagert werden. Im Zielhafen sind die Tanker auf entsprechende Importterminals angewiesen. Für die letzte Meile ist wiederum ein zusätzlicher Verkehrsträger (z. B. Lkw, Bahn, Binnenschiff) erforderlich, mit der Umladung des Wasserstoffs und dem Transport zum Verbraucher.

Im EU-Projekt HYGHER wird die Durchführbarkeit einer innovativen, kosteneffizienten und zuverlässigen Wertschöpfungskette für den Transport von Hochdruck-Wasserstoff von Produktionsstandorten zu Tankstellen aufgezeigt. Starke Einsparungen bei den Investitions- und Betriebskosten werden erzielt, indem die Verdichtung von Wasserstoff am Produktionsstandort erfolgt und der Transport unter hohem Druck durchgeführt wird. (Mack, 2024)

Eine weitere im maritimen Bereich noch nicht im Detail untersuchte Option des Wasserstoffimports ist der Transport von komprimiertem, gasförmigen Wasserstoff in speziellen Druckgascontainern. Hier besteht eine große Flexibilität, da die Wasserstoffcontainer als „Beiladung“ unter Verwendung der bestehenden Infrastruktur und Transportmittel für Standardcontainer transportiert werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass der containerisierte Wasserstoff lediglich am Ausgangspunkt der Transportkette beim Wasserstoffproduzenten komprimiert

und in den Druckgascontainer gefüllt werden muss, wo er während des kompletten Transportvorgangs über See und im Hinterland auf der letzten Meile über lange Zeit ohne Verluste verbleiben kann. Beim Verbraucher angekommen, könnte der Druckgascontainer als Wasserstoffspeicher dienen, so dass der Verbraucher keine eigene Wasserstofflagereinrichtung benötigt. Im Gegensatz dazu sind beim Transport von Wasserstoff als Massengut in großen Drucktanks oder in Form von Flüssigwasserstoff während des Transports Umlade- und Umwandlungsprozesse wie Regasifizierung und Nachkomprimierung nötig, was mit Effizienzverlusten verbunden ist. Der Transport von Flüssigwasserstoff erfordert eine ständige Kühlung und durch den sogenannten Boil-Off-Effekt, dem Entweichen von Wasserstoff, entsteht weiterer Aufwand.

Bremerhaven bietet mit seinen Containerterminals und etablierten Transportketten eine vorhandene Struktur für den Import von containerisiertem Wasserstoff und kann einen Beitrag für die Versorgungssicherheit deutscher Verbraucher mit Wasserstoff leisten.

Der containerisierte Wasserstofftransport eignet sich für Verbraucher mit kleinen bis mittleren Abnahmemengen, da ein Standardcontainer derzeit je nach Bauart ca. einige hundert Kilogramm bis maximal ca. 1,2 Tonnen Wasserstoff aufnehmen kann. Ein containerisierter Wasserstofftransport steht nicht in Konkurrenz zu anderen Transporttechnologien wie Flüssigwasserstoff oder Druckwasserstoff in Großtanks, sondern stellt vielmehr eine Ergänzung dar, um ausländische Quellen grünen Wasserstoffs zeitnah und unter Verwendung bestehender Container-Infrastruktur für kleine und mittlere Abnehmer in Deutschland erschließen zu können. Für größere Verbraucher kann der Wasserstoffcontainer als Einstieg in die Technologie dienen.

Die Nutzung der bestehenden Strukturen für Transport und Umschlag ermöglicht eine flexible Versorgung neuer Abnehmer oder die Einbindung neuer Produzenten. Wasserstoffcontainer werden heute bereits angeboten und sind schnell einsetzbar. In dieser Studie werden die entsprechenden Konzepte und deren Potenziale untersucht und im Hinblick auf eine mögliche Umsetzung bewertet.

Für Bremerhaven als bedeutendem Hafenstandort besteht die Möglichkeit, für die Containerterminals und die Hinterland-Transporteure das bestehende Geschäftsfeld des Container-Umschlags und -transports mit dem Transport dieser Technologie zu erweitern. Auch mit der Entstehung des Wasserstoffpipelinenetzes (European Hydrogen Backbone (EHB), kein Datum) 2035 ist zu erwarten, dass der Wasserstoffcontainer eine flexible, unabhängige Ergänzung bleiben wird.

Das Konzept des containerisierten Wasserstoffs bietet auch für kleine Erzeuger die Möglichkeit, Wasserstoff zu produzieren und die vorhandene Containerlogistik einzusetzen, um von einem beliebigen Ort auf der Welt am Wasserstoffmarkt teilhaben zu können.

Grünem Wasserstoff wird eine große Bedeutung für die zukünftige Energieversorgung zugesprochen und bietet durch die Substitution von konventionellen Brennstoffen hohe CO₂-Einsparpotentiale. Durch eine mögliche Beschleunigung des Einsatzes von blauem bzw. grünem Wasserstoff als klimaneutrale Energieträger hat das Projekt einen umweltrelevanten Aspekt.

Um sicherzustellen, dass importierter Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen stammt, gelten die gleichen Regeln wie für inländisch oder in der EU erzeugten grünen Wasserstoff. Dazu sind

mit Zertifikaten Kriterien für den dafür erforderlichen Strombezug nachzuweisen. (Initiative GET H₂, kein Datum)

2. Technik

Für den Transport von Druckwasserstoff in Containern kann die Infrastruktur genutzt werden, die für Container vorhanden ist. Container werden weltweit auf Straßen, Schienen, Binnenwasserstraßen und über See transportiert und zwischen den Verkehrsträgern umgeladen.

Technische Informationen für den Transport von Druckwasserstoff in Containern sind vom ISL in der Studie „Machbarkeit und Potenziale containerisierter Wasserstofftransporte“, die im Auftrag der Kieserling Stiftung erstellt worden ist, aufgeführt. (Meyer-Larsen, 2023)

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über technische Voraussetzungen für Wasserstoffcontainer und eine Übersicht von Herstellern von Wasserstoffcontainern gegeben.

2.1 Technische Voraussetzungen containerisierter Transporte von Druckwasserstoff

Bei containerisierten Wasserstofftransporten handelt es sich um Gefahrguttransporte. Wasserstoff ist als Gas bzw. als gasförmiger Stoff der Gefahrgutklasse 2 zugeordnet und kann unter Einhaltung von Sicherheitsmaßnahmen, z.B. einer guten Be- und Entlüftung, weltweit transportiert werden.

Für den Transport von Druckwasserstoff in Containern werden Druckgasflaschen in Containern stehend oder liegend verbaut und miteinander verbunden. So kann ein einziger Anschluss zum Befüllen oder Entleeren benutzt werden. Diese Gascontainer mit vielen Elementen werden Multiple-Element Gas Container (MEGC) genannt. Hier wird die Bezeichnung H₂-Container benutzt.

Als Containergrößen kommen insbesondere Standardcontainer der Größen 20'- und 40'-Container infrage. In der Norm ISO 668 (ISO, 2020) hat die Internationale Seeschifffahrts-Organisation (IMO) Innen- und Außenmaße, maximale Gewichte von Standardcontainern definiert. Diese Container sind für den weltweiten Transport genormte Container. Später kamen Standardcontainer mit Überhöhen dazu, die sog. High Cube (HC) Container. Der 45'-Container hat im Überseeverkehr einen Anteil von ca. 1 % und wird i. d. R. nur über Deck geladen. Der europäische Binnenmarkt hat sich auf die 45'HC-Container eingestellt und Reeder bieten im Short-Sea-Containerverkehr passende Stellplätze an. (Meyer-Larsen, 2023)

Standardcontainer haben eine Breite von 2,438 Metern, 20'-Container eine Länge von 6,058 Metern, 40'-Container eine Länge von 12,192 Metern und eine Höhe von 2,591 Metern bzw. in der High Cube-Variante 2,896 Meter. Die im europäischen Markt etablierten 45'HC-Container haben eine Länge von 13,716 Metern.

Für das Gewicht eines Containers ist in der Norm ISO 668 festgelegt, dass Container ein maximal zulässiges Bruttogesamtgewicht von 30,48 Tonnen nicht überschreiten dürfen. Dieses Maß gilt unabhängig von der Größe des Containers, wobei 20'-Container eine Eignung als „heavy-tested“ nachweisen müssen. Ohne den Nachweis „heavy-tested“ dürfen 20'-Container ein maximales Gesamtgewicht von 24 Tonnen nicht überschreiten. Diese Container

können mit den erforderlichen Zertifikaten [vgl. Kapitel 3] im Straßen-, Bahn-, Binnenschiff- und Seeverkehr transportiert werden. Das Leergewicht von 20'- und 20'HC-Containern liegt bei 2,4 Tonnen, von 40'- und 40'HC-Containern bei 4,0 Tonnen, von 45'HC Containern bei 4,8 Tonnen. Beispielsweise liegt die Zuladung bei einem 40'-Container bei ca. 27 Tonnen.

Bei H₂-Containern ist das Gewicht ein wichtiger Parameter, da die eingesetzten Druckgasflaschen ein hohes Eigengewicht aufweisen und die Container mit Druckgasbehältern möglichst voll ausgefüllt sein sollten, um eine große Menge an Wasserstoff befördern zu können. Das Gewicht der genutzten Druckgasflaschen hängt stark von dem eingesetzten Druckbehälter Typ ab. Der schwere Stahl-Druckbehälter Typ 1 mit hohen Wandstärken wird als Lagercontainer oder für den innerbetrieblichen Wasserstofftransport eingesetzt. Der Stahl-Druckbehälter Typ 2 ist mit einem harzgetränkten Mantel aus Glas- oder Kohlefasern verstärkt und wird, bei einem höheren Druck als bei Typ 1, für stationäre Anwendungen eingesetzt. Der Druckbehälter Typ 3 hat einen metallenen Innenbehälter (z. B. Aluminium) mit einer Ummantelung aus Kohlefasern. Aufgrund eines günstigen Verhältnisses von gespeichertem Wasserstoff zum Gewicht werden die Druckbehälter Typ 3 in erster Linie für mobile Anwendungen, z. B. als Tanks in Fahrzeugen, eingesetzt. Druckbehälter Typ 4 sind der aktuelle Stand der Technik und haben einen mit Kohlefasern ummantelten Innenbehälter aus Kunststoff. Durch diese Bauweise sind die Druckbehälter bei höheren Materialkosten nochmals leichter und werden im Transport- oder mobilen Bereich eingesetzt. (EMCEL, 2020)

Im Gegensatz zu H₂-Großtankschiffen sind H₂-Container heute bereits verfügbar.

Für die Gestellung des Wasserstoffcontainers beim Verbraucher ist ein kundenseitiger Kran oder ein Lkw-Seitenlader erforderlich. Falls der Verbraucher einen Wasserstoffspeicher vorhält, kann der Wasserstoff aus dem Wasserstoffcontainer direkt in den Speicher gepumpt werden. Eine weitere Möglichkeit ist, den Wasserstoffcontainer auf einem Trailer zu liefern. Für den Einsatz des Wasserstoffs muss der Wasserstoff ggf. auf den passenden Druck komprimiert oder der Druck gemindert werden.

Die Reinheit des Wasserstoffs kann eine Qualitätsanforderung sein. Mindeststandard ist die Reinheit 3.0, entsprechend einer Reinheit von 99,90 %. Die Zahl vor dem Punkt definiert dabei in dem Prozentwert die Anzahl der Neunen, die Zahl nach dem Punkt definiert die dann folgende Ziffer. Beispielsweise haben Brennstoffzellen eine Qualitätsanforderung der Reinheit 3,7, entsprechend 99,97 %.

2.2 Hersteller von Wasserstoffcontainern

Es konnten 13 Hersteller als Anbieter von H₂-Containern recherchiert werden. Bei den Herstellern waren insbesondere diejenigen interessant, die H₂-Container für den Transport und nicht als Lagercontainer vorsehen. Auch H₂-Container, die im innerbetrieblichen Transport eingesetzt werden, wurden nicht betrachtet, da sie aufgrund der Gewichte nicht für den allgemeinen Transportverkehr geeignet sind.

In der folgenden Tabelle wird dargestellt, welche der Containertypen 20', 20'HC, 40', 40'HC und 45'HC als H₂-Container für Druckwasserstoff von den Herstellern angeboten werden. Diese Container gehören zu den gängigsten Containergrößen. Weitere Containergrößen wurden nicht betrachtet, auch wenn sie von den Herstellern angeboten wurden.

Tabelle 1: Angebotene H₂-Containertypen

Hersteller	Land	H ₂ -Containertypen				
		20'	20'HC	40'	40'HC	45'HC
APEX Group	Deutschland	x				
Calvera Hydrogen	Spanien	x		x		x
Cylinders Holding	Tschechien	x				
EKC Everest Kanto Cylinder Limited	Indien	x	x	x	x	
Gaznet OÜ	Estland	x	x	x	x	
Hensoldt	Frankreich		x			
Hexagon Purus	Norwegen		x		x	x
Luxfer Gascylinders	UK		in Entwicklung (20', 40', 45')			
NPROXX	Deutschland	x		x		
Steelhead Composites	USA		x		x	
Ti-APM	Italien	x				
Worthington Industries	USA	x				
Wystrach	Deutschland	x		x		x

Quelle: (Meyer-Larsen, 2023)

Mit verschiedenen Druckstufen können unterschiedliche Mengen an Wasserstoff in einem H₂-Container gespeichert werden. In der folgenden Tabelle wird dargestellt, welche Mengen an Wasserstoff jeweils unter Angabe der höchsten – von den Herstellern angegebenen – Druckstufe gespeichert werden kann.

Tabelle 2: Wasserstoffinhalt pro Containertyp

Hersteller	Land	Druck bar	Wasserstoffinhalt pro Containertyp [kg]				
			20'	20'HC	40'	40'HC	45'HC
APEX Group	Deutschland	500					
Calvera Hydrogen	Spanien	500					
Cylinders Holding	Tschechien	300	350				
EKC Everest Kanto Cylinder Limited	Indien	350					
Gaznet OÜ	Estland	250					
Hensoldt	Frankreich	500		450			
Hexagon Purus	Norwegen	500		565		1115	
Luxfer Gascylinders	UK	n.a.	500				1.400
NPROXX	Deutschland	640					
Steelhead Composites	USA	345		384		925	
Ti-APM	Italien	380					
Worthington Industries	Österreich/USA	700					
Wystrach	Deutschland	500		521		1.106	1.244

Quelle; ISL, eigene Recherche

Alle 13 Hersteller wurden angeschrieben und ein Fragebogen vorgelegt. Das Ergebnis von zwei Rückläufern, Messgesprächen und weiterer Recherche sind in diese Studie eingeflossen.

3. Regularien

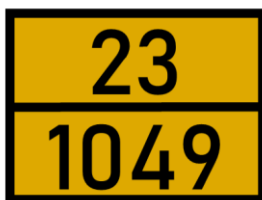
Wasserstoff unterliegt als Gefahrgut besonderen Regularien, um einen sicheren Transport zu gewährleisten. In diesem Kapitel werden insbesondere Regularien zu unter Druck stehendem Wasserstoff in Containern betrachtet.

Informationen zu Regularien für den Transport von Druckwasserstoff in Containern sind vom ISL in der Studie „Machbarkeit und Potenziale containerisierter Wasserstofftransporte“, die im Auftrag der Kieserling Stiftung erstellt worden ist, aufgeführt. (Meyer-Larsen, 2023)

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick gegeben.

3.1 Rechtliche Voraussetzungen containerisierter Transporte von Druckwasserstoff

Wasserstoff unter Druck ist der Gefahrgutklasse 2 für Gase und gasförmige Stoffe zugeordnet. Innerhalb der Gefahrgutklasse 2 ist Druckwasserstoff der Unterklasse 2.1 für brennbare Gase zugeordnet.



Beim Transport ist Druckwasserstoff kennzeichnungspflichtig mit einer Warntafel mit der Gefahrunummer 23 (entzündliches Gas) und der UN Nummer 1049 (Wasserstoff, verdichtet) kennzeichnungspflichtig.

Nach ADR 4.2.4.7 müssen „ungereinigte leere und nicht entgaste MEGC denselben Vorschriften entsprechen wie MEGC, die mit dem vorher beförderten Stoff befüllt sind“, d. h. die geleerten Container mit Druckwasserstoff sind ebenso als Gefahrgut kennzeichnungspflichtig (UWS Umweltmanagement GmbH, 2017).



Mit einem sogenannten Gefahr- oder Großzettel (Placard), einer auf der Spitze stehenden Raute, wird mit roter Farbe die Gefahrgutklasse signalisiert und kann optional mit einem Piktogramm (Flamme) und der Ziffer 2 für die Gefahrgutklasse versehen sein.

In den H₂-Containern sind miteinander verbundene Druckbehälter verbaut, die ISO-Normen bzgl. Design, Konstruktion, Kennzeichnung und Prüfungen entsprechen müssen.

Beim Transport von Druckwasserstoff ist für H₂-Container je Verkehrsträger eine Zulassung erforderlich:

1. Straße: ADR (Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter) (Bundesministerium der Justiz, 2021)
2. Schiene: RID (Ordnung über die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter) (OTIF, 2019)
3. Binnenwasserstraße: ADN (Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung von gefährlichen Gütern auf Binnenwasserstraßen) (Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, 2023)
4. Seeverkehr: IMDG Code (International Maritime Dangerous Goods Code) (IMO, kein Datum)
5. Luftverkehr: ICAO-TI / IATA (International Civil Aviation Organization – Technical Instructions / International Air Transport Association)

Die Regelungen ICAO-TI und IATA für den Luftverkehr werden hier nicht weiter berücksichtigt.

In der folgenden Abbildung wird dargestellt, wie in Deutschland internationale Regelwerke in nationales Recht übernommen werden.

Abbildung 1: Übernahme internationaler Regelwerke in nationales Recht

Internationale Regelwerke



Auf den internationalen Regelwerken basierende Übereinkommen



Übernahme in nationales Recht



Die Übereinkommen ADR, RID, ADN und IMDG basieren auf den internationalen Regelwerken CSC (International Convention for Safe Containers) und den UN Modellvorschriften (UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods). In dem Regelwerk CSC wird ein sicherer Umgang mit Containern geregelt. Das umfasst die Verpflichtung für regelmäßige Wartungen. Die UN Modellvorschriften enthalten Regelwerke für den Umgang mit Gefahrgut. In den UN Modellvorschriften sind die 9 Gefahrgutklassen definiert. Durch die gesetzlichen Regelungen GGBefG, GGVSEB und GGVSEE erfolgt die Übernahme in nationales Recht.

Die Zertifizierungen ADR, RID und ADN sind europäische Zulassungen, die im weltweiten Transport, ggf. mit nationalen Regelungen, angewendet werden. Der IMDG Code ist eine internationale Beförderungsvorschrift, die von der IMO (Internationale Seeschifffahrtsorganisation) für gefährliche Güter im Seeschiffsverkehr erstellt worden ist.

In der folgenden Tabelle wird dargestellt, welche Zertifikate für die H₂-Container von den Herstellern angegeben werden.

Tabelle 3: Zertifikate

Hersteller	Land	ADR	RID	ADN	IMDG
APEX Group	Deutschland			keine Angabe	
Calvera Hydrogen	Spanien	x			x
Cylinders Holding	Tschechien	x	x		x
EKC Everest Kanto Cylinder Limited	Indien	x			
Gaznet OÜ	Estland	x	x	x	
Hensoldt	Frankreich	x	x	x	x
Hexagon Purus	Norwegen	x			
Luxfer Gascylinders	UK			keine Angabe	
NPROXX	Deutschland	x	x	x	
Steelhead Composites	USA			keine Angabe	
Ti-APM	Italien			keine Angabe	
Worthington Industries	USA			keine Angabe	
Wystrach	Deutschland	x		auf Nachfrage	

Quelle; ISL, eigene Recherche

Werden die Hersteller, die keine Angaben gemacht haben, ausgeklammert, haben die H₂-Container heute alle eine Straßenzulassung ADR, die Zertifikate ADN (Binnenschiff), RID (Bahn) und IMDG (Seetransport) werden von ca. 50% der Hersteller angeboten. Die Zulassungen müssen bei heutiger Einzelfertigung pro Container genehmigt werden. Mit einer Serienfertigung können Zulassungen für alle Container einer Serie erlangt werden.

Für den Umgang mit Gefahrgut müssen Mitarbeiter geschult sein.

Nach der Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV, Abschnitt 3, § 18 bedürfen Anlagen einschließlich der Lager- und Vorratsbehälter zum Befüllen von Land-, Wasser- und Luftfahrzeugen mit entzündbaren Gasen der Erlaubnis der zuständigen Behörden. (Bundesministerium der Justiz)

Werden mehr als 3 Tonnen Wasserstoff gelagert BlmSchV, Ziffer 9.3, Nr. 17 Anhang 2 (Bundesministerium der Justiz, 2017), greift die Bundesimmissionsschutzverordnung, die besagt, dass nach BlmSchV, Ziffer 9.3, Nr. 17 Anhang 2 eine Genehmigung im vereinfachten Verfahren erforderlich ist. (Bundesministerium der Justiz, kein Datum)

Folgende Tabelle zeigt, welche Gesamtgewichte die H₂-Containertypen bei maximaler Füllung erreichen können.

Tabelle 4: Gesamtgewicht pro Containertyp

Hersteller	Land	Gesamtgewicht pro Containertyp [kg]				
		20'	20'HC	40'	40'HC	45'HC
APEX Group	Deutschland					
Calvera Hydrogen	Spanien					
Cylinders Holding	Tschechien	28.380				
EKC Everest Kanto Cylinder Limited	Indien					

Gaznet OÜ	Estland		
Hensoldt	Frankreich		
Hexagon Purus	Norwegen	16.226	31.485
Luxfer Gascylinders	UK		
NPROXX	Deutschland		
Steelhead Composites	USA	14.784	29.232
Ti-APM	Italien		
Worthington Industries	USA		
Wystrach	Deutschland	13.500	26.750 32.000

Quelle; ISL, eigene Recherche

Sollen Container im internationalen Seeverkehr eingesetzt werden, darf ein zulässiges Gesamtgewicht von 30.400 kg nicht überschritten werden. Im Straßenverkehr sind höhere Gewichte möglich, da das zulässige Gesamtgewicht des Lastzuges einschließlich Container maßgebend ist. Die Gewichtsangaben deuten darauf hin, dass H₂-Container insbesondere für den Straßenverkehr konzipiert sind.

3.2 Möglichkeiten bzw. Barrieren für den Seetransport

Seetransporte von Containern unterliegen umfangreicheren Vorgaben als Transporte auf Straße, Schiene oder Binnenschiff. Die Vorgaben beziehen sich auf die Containergrößen bzw. deren Abmessungen, die Containergewichte und deren Stapelbarkeit. Gefahrgutcontainer benötigen für den Seetransport eine IMDG-Zulassung.

Möglichkeiten bzw. Barrieren zur Erlangung einer Zulassung für den Seetransport

Die Untersuchung hat ergeben, dass die überwiegende Zahl der H₂-Hersteller, die Angaben zu angebotenen Zertifikaten gemacht haben, eine ADR-Zulassung für die Straße vorweisen können. Eine Zulassung für Bahn (RID), Binnenschiff (ADN) und Seeverkehr (IMDG) wurde nur von einer kleineren Anzahl Hersteller angegeben. Der Zulassung für die Straße kann die höchste Bedeutung zugemessen werden, da damit an Land alle Ziele erreicht werden können. Für einen weltweiten Transport wäre zusätzlich eine IMDG-Zulassung erforderlich. Die Erteilung von IMDG-Zertifikaten führt durch die heute noch in Einzelanfertigung produzierten H₂-Container zu zusätzlichem Aufwand und höheren Kosten.

Eine IMDG-Seezulassung ist an höhere Auflagen als eine ADR-Zulassung gebunden, z. B.

- H₂-Container können auf Frachtschiffen an Deck oder unter Deck gestaut werden, falls deren Fahrgastzahl auf höchstens 25 oder 1 Fahrgast je 3 m der Gesamtschiffslänge begrenzt ist, je nachdem, welche Anzahl größer ist.
- Nach IMDG-Code 7.4.2.4.1 gilt zudem, dass Container bei Schiffen mit wetterdichten Lukendeckeln nur unter Deck gestaut werden dürfen, wenn der Laderaum mit einer mechanischen Lüftung ausgestattet ist.
- Die Stauung von H₂-Containern muss so erfolgen, dass ein Eindringen entweichender Dämpfe in Wohn- und Aufenthaltsräume unwahrscheinlich ist.
- Eine Stauung von H₂-Containern muss so erfolgen, dass eine Trennung von Chlor gegeben ist. Weitere Trennvorschriften von komprimiertem Wasserstoff sind im IMDG Code 7.2.4 Trenntabelle enthalten (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2020).

- H₂-Container müssen aus Sicherheitsgründen in Sektoren aufgeteilt werden. Dabei ist nach ADR pro 5.000 Liter und nach IMDG pro 3.000 Liter Wasserstoff ein Sektor erforderlich. So sind beispielsweise bei einem 40'-Container mit 40.000 Liter Wasserstoff nach ADR im Straßenverkehr 8 Sektoren und nach IMDG im Seeverkehr 14 Sektoren gefordert. Die Sektoren können technisch zu einem System miteinander verbunden.
- Beim Seetransport bestehen höhere Anforderungen an Container, da Erschütterungen stärker sein können.
- Druckbehälter müssen nach IMDG im Seeverkehr einem 3-fachen Berstdruck, im Straßenverkehr nach ADR einem 2,5-fachen Berstdruck standhalten.

Mündliche Aussagen von Herstellern zu H₂-Containern zu einer See-Zulassung reichten von „ist vorhanden“, „ist in Planung“, „wird auf Anfrage angeboten“ bis „wird sich nie durchsetzen“.

Möglichkeiten bzw. Barrieren zur Stapelbarkeit

Die von der International Maritime Organisation (IMO) entwickelte ISO-Norm 668 definiert die im internationalen Seetransport eingesetzten Standardcontainer. Eine Bedingung, der ISO-Norm 668 besagt, dass Container mindestens 6-fach übereinander stapelbar sein müssen. Teilweise sind Standardcontainer bis zu neun hoch stapelbar. Das Dach und die Seitenwände nehmen dabei keine Last auf. Die Container stehen auf ihren jeweiligen Eckpfeilern, die beim Stapeln miteinander verbunden werden. Pro Eckpfeiler kann eine maximale Belastung von 60 Tonnen aufgenommen werden. (containerbasis.de, 2017)

Für jedes Schiff werden im Seetransport definierte Stellplätze für bestimmte Gefahrgutklassen ausgewiesen. Für den Transport von Gasen wie z. B. Druckwasserstoff in Containern ist in diesen Bereichen für ausreichende Belüftung zu sorgen.

3.3 Regulatorik containerisierter Wasserstofftransporte im Vor- und Nachlauf

Für den Transport von H₂-Containern im Vor- und Nachlauf müssen die Vorschriften für Gefahrguttransporte eingehalten werden. Wird im Vor- oder Nachlauf die Bahn eingesetzt, sind die Vorgaben aus dem RID zu berücksichtigen. Wird im Vor- oder Nachlauf das Binnenschiff eingesetzt, sind die Vorgaben aus dem ADN zu berücksichtigen. Bei der Transportkette wird hier der Lkw für den Vor- und Nachlauf favorisiert. Beim Straßentransport von Gefahrgut ist das ADR zu berücksichtigen.

Alle Vorschriften haben gemein, dass Vorgaben hinsichtlich Verpackung, Ladungssicherung und Kennzeichnung einzuhalten sind.

Unter Einhaltung der Vorschriften ist der Transport von Wasserstoff in Containern ein definierter Gefahrguttransport.

4. Logistikkonzepte

H₂-Container können mittels einer multimodalen Transportkette inklusive der letzten Meile vom H₂-Produzenten bis zu kleinen und mittleren Verbrauchern, z.B. Wasserstoff-Tankstellen, Blockheizkraftwerken für die Quartiersversorgung oder wissenschaftlichen Einrichtungen,

transportiert werden, wo der Wasserstoff entnommen und genutzt wird. Anschließend werden „leere“ Container zurück zum Produzenten transportiert. Für den Transport von H₂-Containern kann die vorhandene Infrastruktur des Containertransports genutzt werden. Der Wasserstoff wird dabei beim H₂-Produzenten komprimiert in den H₂-Container gefüllt und verbleibt auf der gesamten Transportstrecke im H₂-Container, bis der Wasserstoff vom Kunden verbraucht wird.

4.1 Beteiligte

In einer Logistikkette für H₂-Container vom H₂-Produzenten zum Verbraucher und zurück sind die folgenden Partner beteiligt:

- Importeur
- H₂-Produzent
- Transportdienstleister (Straße, Schiene, Binnenschiff)
- Reeder (Seetransport)
- Terminals
- Verbraucher

Der Importeur organisiert die Logistikkette beginnend beim H₂-Produzenten mit den Transportdienstleistern für Vor- und Nachlauf (auf Straße, Schiene bzw. Binnenwasserstraße) und den Reedern für den Seetransport sowie den Terminals für die Umschlagvorgänge in den Seehäfen. Sobald der Wasserstoff des H₂-Containers verbraucht ist, erfolgt der Rücktransport des leeren H₂-Containers vom Verbraucher zum H₂-Produzenten. Der Rücktransport des leeren H₂-Containers sollte ebenfalls vom Importeur übernommen werden.

4.2 Ketten containerisierter Wasserstofftransporte

Nicht für alle Export-Hafenstandorte gibt es passende Relationen, die für einen Transport von H₂-Containern nach Bremerhaven geeignet sind. Ist keine Relation zwischen dem Exportterminal und Bremerhaven vorhanden, fallen höhere Kosten für zusätzliche Transporte an. Das kann bedeuten, dass der H₂-Container z.B. zu einem weiter entfernten Exportterminal transportiert werden muss oder dass ein Transshipmenttransport, also eine zwischenzeitliche Umladung auf ein anderes Schiff, erforderlich wird, um einen Transport nach Bremerhaven zu ermöglichen.

Für den H₂-Produzenten ist ein Standort in der Nähe eines Exporthafens empfehlenswert. Der Lkw ist das flexibelste aller möglichen Verkehrsträger für Transporte zwischen H₂-Produzenten und Exportterminal. Abhängig von der Produktionsmenge kann ein eigener Bahn- oder Binnenschiffsanschluss sinnvoll sein. Der Seetransport ist ein großer Zeitverbraucher in der Transportkette; bei einer Verdoppelung der Entfernung kann von der doppelten Transportdauer ausgegangen werden. Für die Transportdauer müssen Zwischenstopps an weiteren Be- und Entladehäfen sowie Transshipmentverkehre mit einkalkuliert werden. Ist der H₂-Container in Bremerhaven angekommen, wird ein Lkw für den Transport zum (Klein-)Verbraucher auf der letzten Meile erforderlich sein, da davon ausgegangen werden kann, dass beim Verbraucher kein Bahn- oder Binnenschiffsanschluss vorhanden ist.

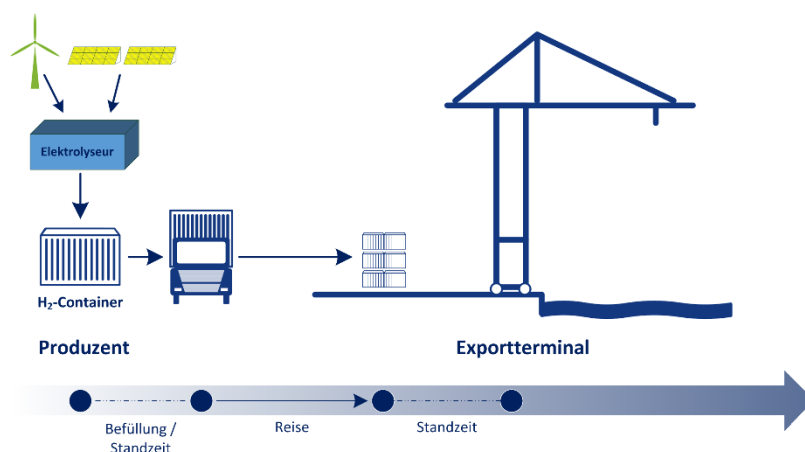
Im Logistikkonzept eines H₂-Containers muss der gesamte Umlauf betrachtet werden, d. h. der Import des vollen H₂-Containers vom H₂-Produzenten zum (Klein-)Verbraucher und den Rücktransport (Export) des leeren H₂-Containers vom Verbraucher zum H₂-Produzenten.

Der logistische Ablauf besteht aus den Reisezeiten der eingesetzten Verkehrsträger, den Umschlagsvorgängen und den Standzeiten des H₂-Containers (Container wartet auf Weitertransport). Die Umschlagsdauer eines einzelnen Containers wird bei den Verkehrsträgern Seeschiff, Binnenschiff und Bahn von der Gesamtzahl der umzuschlagenden Container beeinflusst.

Im Folgenden werden mögliche Transportketten für den Vor- und Nachlauf sowie den Seeverkehr (Hauptlauf) beispielhaft aufgezeigt und deren Besonderheiten kurz beschrieben.

Für den Vorlauf, also den Transportweg zwischen Wasserstoffproduzenten und dem Exportterminal, werden Transporte per Lkw und Bahn dargestellt. Folgende Abbildung zeigt eine vereinfachte Darstellung der Transportkette per Lkw bis zum Hafen.

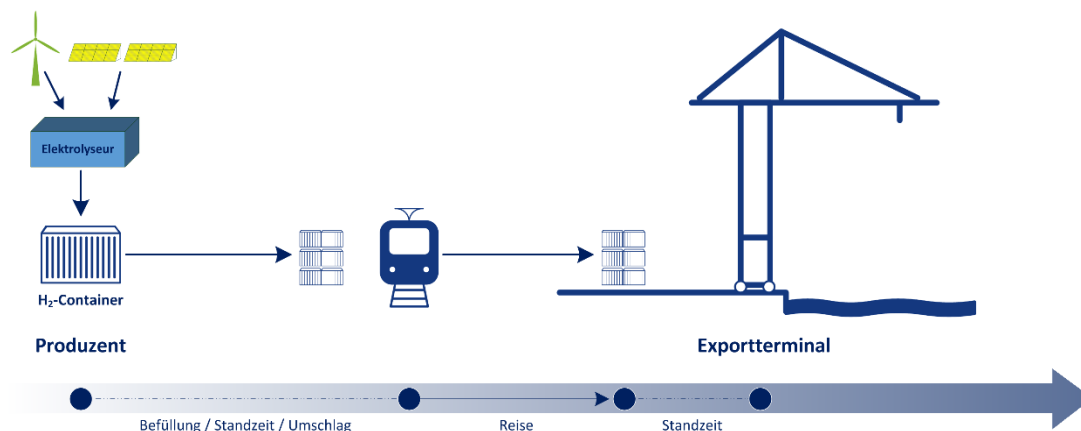
Abbildung 2: Lkw-Transporte zum Exportterminal



Der Hersteller befüllt den H₂-Container mit aus regenerativer Energie erzeugtem grünen Wasserstoff und lädt ihn auf einen Lkw. Der Lkw transportiert den H₂-Container zum nächstgelegenen Exportterminal. Nach der Entladung am Terminal ist der H₂-Container bereit für den Seetransport. Lkw sind flexibel einsetzbar, so dass kostenpflichtige Standzeiten im Terminal vermieden werden können. Standzeiten entstehen, da Container in Containerterminals allgemein nicht direkt umgeschlagen werden.

Ein Einsatz der Bahn ist dann sinnvoll, wenn der H₂-Produzent über einen Gleisanschluss verfügt oder sich ein Bahnterminal in der Nähe befindet. Für den Transport des H₂-Containers wird dann die Bahn im Direktverkehr oder zusätzlich ein Lkw für den Transport zum Bahnterminal eingesetzt.

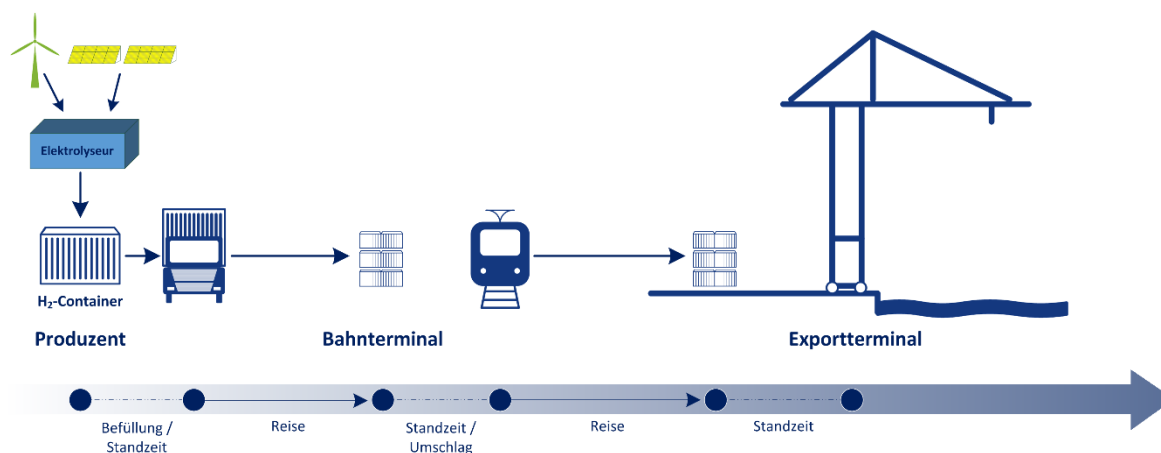
Abbildung 3: Bahntransporte zum Exportterminal mit Gleisanschluss



Verfügt der Wasserstoffproduzent über einen Gleisanschluss, kann der Lkw im Vorlauf durch einen Bahntransport ersetzt werden. Um Standzeiten der H₂-Container auf dem Exportterminal zu vermeiden, sollten die Fahrpläne der Züge entsprechend mit den Schiffsabfahrten abgestimmt sein. Daher treten bis zur Beladung eines H₂-Containers auf die Bahn zusätzliche Stand- und Umschlagszeiten auf.

Ist kein Gleisanschluss vorhanden, ist eine Kombination aus Lkw und Bahn möglich:

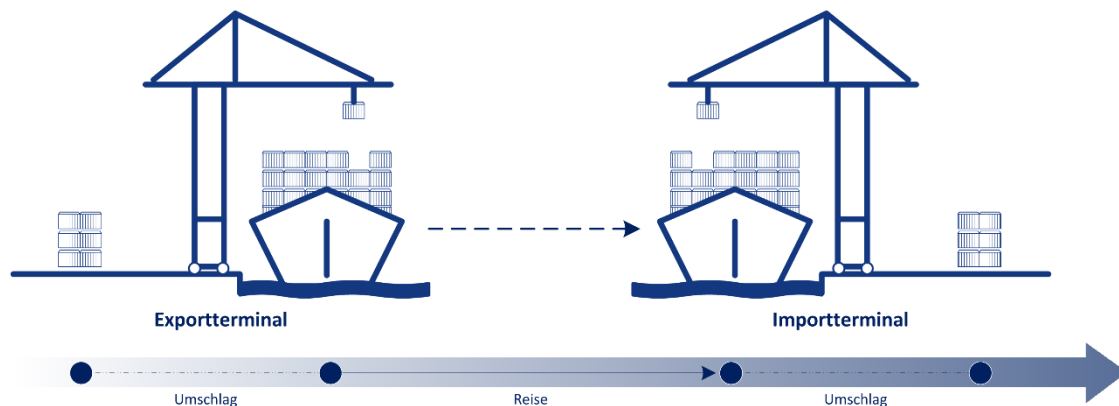
Abbildung 4: Bahntransporte zum Exportterminal ohne Gleisanschluss



Die H₂-Container werden beim Produzenten per Lkw abgeholt und beim Bahnterminal für den Weitertransport zum Terminal gesammelt. Die Abfahrten der Bahn sollten wiederum auf die Schiffsabfahrten abgestimmt sein. Abhängig von den Fahrplänen der Seeschiffe entstehen Standzeiten der H₂-Container, da diese i. d. R. nicht unmittelbar nach Befüllung bzw. nach Anlieferung am Exportterminal auf ein Seeschiff geladen werden.

Im anschließenden Seeverkehr (Hauptlauf) sind zwei Varianten denkbar. Entweder besteht eine Relation vom exportierenden Land zum Importterminal (hier Bremerhaven) oder die H₂-Container erreichen Bremerhaven mit einem zusätzlichen Transshipmentvorgang, d. h. der H₂-Container wird an einem anderen Seehafen (in Europa) auf ein Schiff nach Bremerhaven umgeladen. Beim Seetransport kann es Zwischenstopps an weiteren Terminals zwischen Ex- und Importterminal zum Laden und Löschen von Containern geben. In der folgenden Abbildung wird der Seetransport dargestellt.

Abbildung 5: Seetransport vom Ex- zum Importterminal

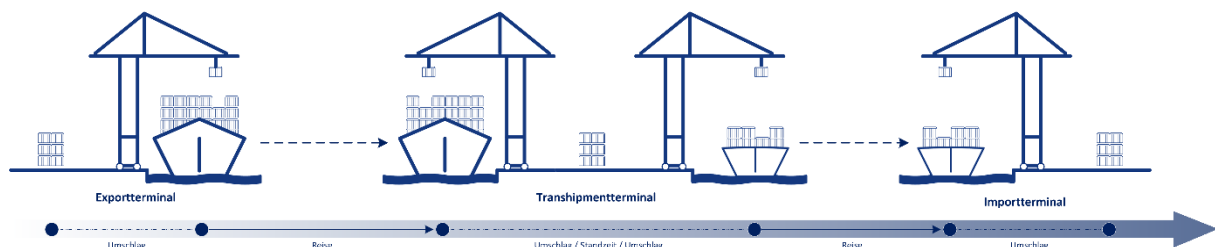


Der H₂-Container wird im Exportterminal verladen und geht i. d. R. laut Fahrplan auf die Reise bis zum Importterminal, wird dort gelöscht und für den Weitertransport bereitgestellt.

Die Dauer der Reise hängt insbesondere von der Entfernung bis zum Importterminal ab. Auch verlängert sich die Reisedauer, falls die Relation mit Zwischenstopps durchgeführt wird.

Werden Wasserstoffimporte aus Ländern betrachtet, von denen es keine Relation nach Bremerhaven gibt, könnten die Transporte über einen Transshipmenthafen (z.B. Häfen der Westrange) durchgeführt werden:

Abbildung 6: Seetransport mit Transshipmentbewegung

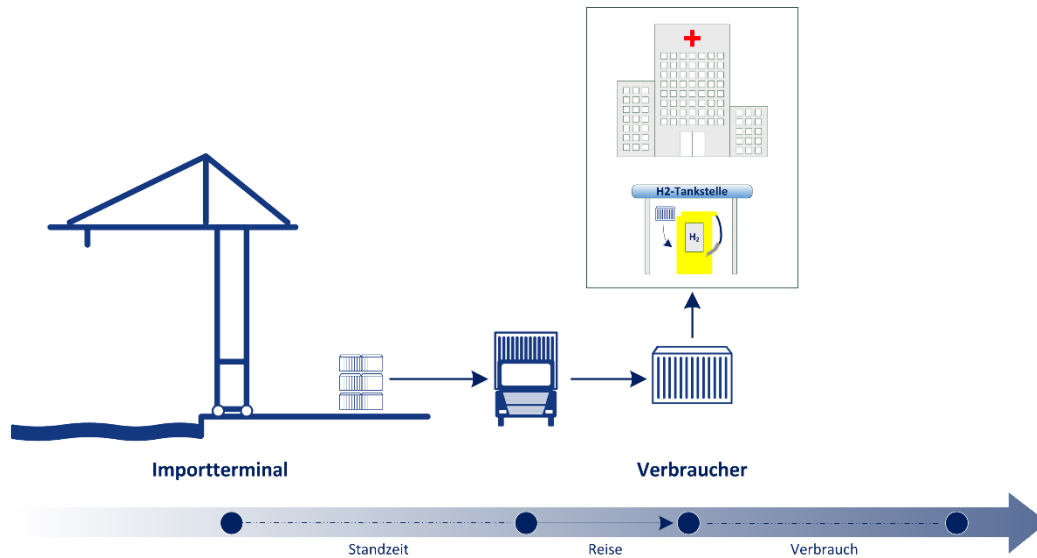


In dieser Variante treten am Transshipmentterminal zusätzliche Stand- und Umschlagszeiten auf, welche die gesamte Transportzeit verlängern. Dies ist aber eine Möglichkeit für einen Wasserstoffimport aus Ländern, die keine Relationen nach Bremerhaven anbieten.

Für den Nachlauf, d. h. den Transportweg vom Importterminal bis zum Verbraucher, ist der Einsatz von drei unterschiedlichen Verkehrsträgern denkbar: Lkw, Bahn oder Binnenschiff. Der Einsatz von Bahn oder Binnenschiff erfolgt immer in Kombination mit dem Lkw für die letzte Meile, da hier von einer Versorgung von Kleinverbrauchern ausgegangen wird, die i. d. R. weder einen Gleis- noch einen wasserseitigen Anschluss für Binnenschiffe haben.

Der Prozess mit Lkw-Transport lässt sich mit einer kurzen Standzeit des H₂-Containers auf dem Terminal organisieren.

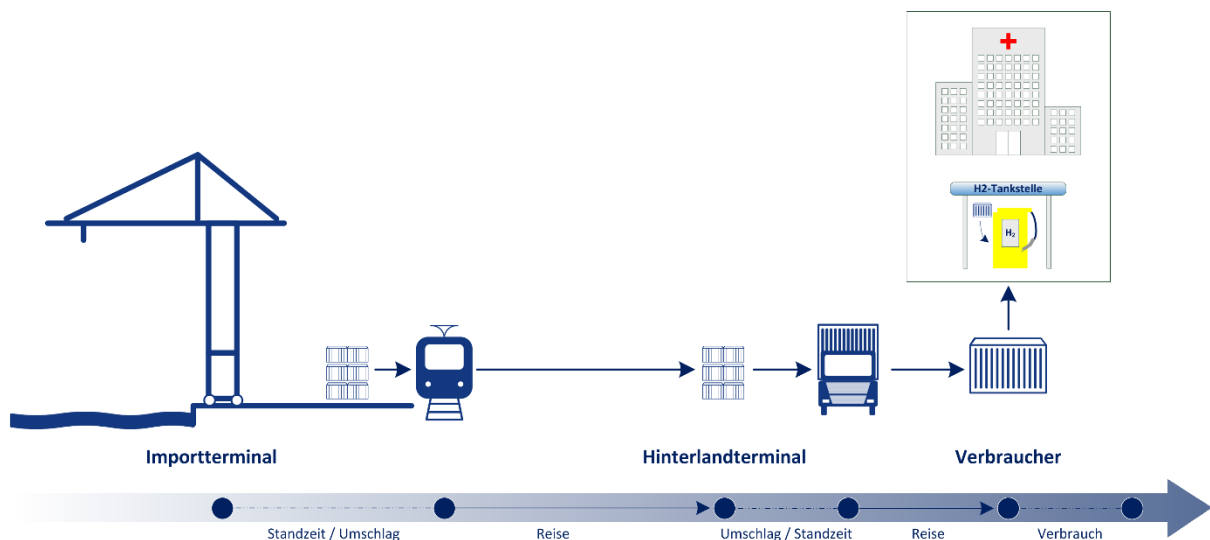
Abbildung 7: Nachlauf bis zum Verbraucher mit dem Lkw



Der Lkw transportiert den H₂-Container direkt zu dem Verbraucher. In dieser Darstellung wird beim Verbraucher der Wasserstoff direkt aus dem H₂-Container verbraucht. Dazu ist beim Verbraucher eine Be- und Entladevorrichtung oder ein Lkw mit Be- und Entlademöglichkeit erforderlich. Eine andere Option ist ein Lagertank beim Verbraucher, das direkt mit dem Wasserstoff des H₂-Containers aufgefüllt wird. Diese Variante hat den Vorteil, dass der H₂-Container auf dem Lkw verbleiben kann und der leere H₂-Container unmittelbar wieder auf die Reise geschickt werden kann.

In der folgenden Abbildung werden Bahn- und Lkw-Transport miteinander kombiniert dargestellt.

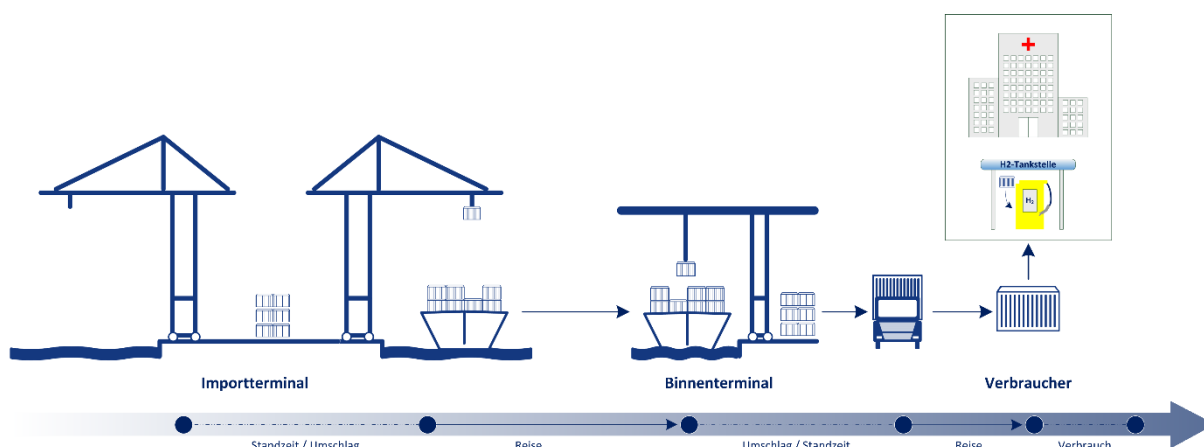
Abbildung 8: Nachlauf bis zum Verbraucher mit der Bahn



Der H₂-Container wird per Bahn bis zu einem dem Verbraucher nächstgelegenen Umschlagsbahnhof (Hinterlandterminal) transportiert. Der Transport auf der letzten Meile, vom Umschlagsbahnhof zum Verbraucher, wird von einem Lkw durchgeführt. Durch den (zusätzlichen) Einsatz der Bahn verlängert sich die Reisezeit, da auch die Bahn an Fahrpläne gebunden ist und zusätzliche Umschlagsvorgänge erforderlich sind.

Statt der Bahn kann auch ein Binnenschiff eingesetzt werden.

Abbildung 9: Nachlauf bis zum Verbraucher mit dem Binnenschiff

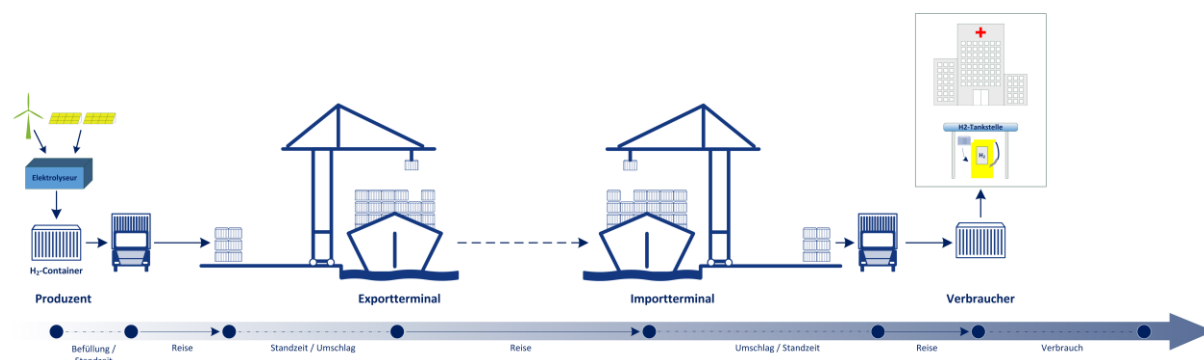


Vergleichbar mit der Bahn fallen in dieser Variante sowohl am Importterminal als auch am Binnenterminal zusätzliche Umschlagsvorgänge mit damit verbundenen Standzeiten an. Ebenfalls ist ein Lkw für die letzte Meile notwendig.

Für die gesamte Transportkette vom Produzenten bis zum Verbraucher sind, je nach den örtlichen Gegebenheiten bei den Produzenten und Verbrauchern, alle Kombinationen der aufgezeigten Verkehrsträger im Vor- und Nachlauf sowie im Seeverkehr denkbar.

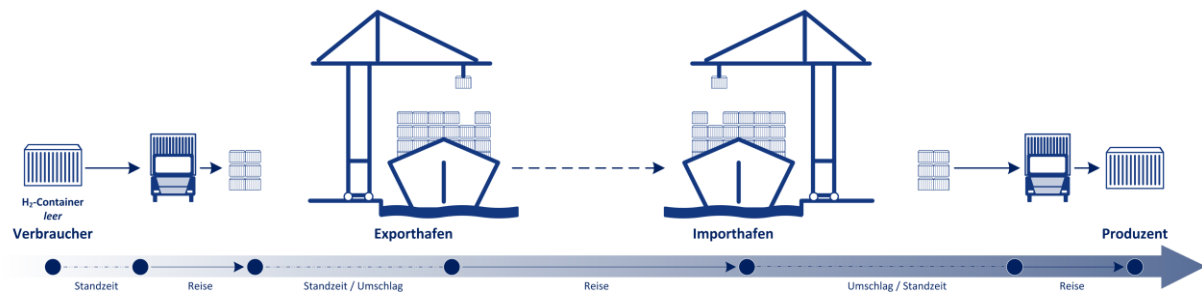
Im Folgenden wird exemplarisch eine durchgängige Prozesskette dargestellt. Dazu wird in Abbildung 10 der Transport eines vollen H₂-Containers vom Produzenten zum Verbraucher mit Vorlauf per Lkw (siehe Abbildung 2), Hauptlauf vom Ex- zum Importterminal (siehe Abbildung 5) und Nachlauf per Lkw (siehe Abbildung 7) dargestellt.

Abbildung 10: Transportkette voller H₂-Container vom Produzenten zum Verbraucher



Nach der Entleerung des H₂-Containers muss dieser mittels derselben oder aber einer abweichenden Transportkette für eine erneute Befüllung wieder zurück zum Produzenten transportiert werden. In Abbildung 11 wird dieser Rücktransport des leeren H₂-Containers mit Einsatz von Lkw für Vor- und Nachlauf dargestellt.

Abbildung 11: Transportkette leerer H₂-Container vom Verbraucher zum Produzenten



Nach einer Standzeit des Leercontainers während der Anforderung eines Lkw für den Rücktransport zum Exporthafen treten anschließend vergleichbare Reise-, Umschlags- sowie Standzeiten auf, bis der Rücktransport bei der Anlieferung des Containers beim Wasserstoffproduzenten endet.

5. Ökonomie

In PROVIDE wurden die Potenziale containerisierter Wasserstoffimporte für eine kurzfristige Realisierung von maritimen Wasserstoffimporten unter Nutzung der in Deutschland existierenden Containerterminals untersucht.

Ziel ist es, aufzuzeigen, ob und unter welchen Bedingungen eine wirtschaftliche Tragfähigkeit von maritimen containerisierten Wasserstoffimporten gegeben ist.

Dazu werden Referenz-Hafenstandorte definiert und untersucht, für welche Standorte wirtschaftliche Voraussetzungen gegeben sein könnten.

5.1 Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Annahmen wurden so realistisch wie möglich getroffen

5.1.1 Betrachtungszeitraum

Theoretisch kann sofort mit dem Import von Wasserstoff in H₂-Containern begonnen werden, da die logistischen Ketten vorhanden sind. Jedoch bedarf es einer Vorlaufzeit, um Verbraucher und H₂-Produzenten zu gewinnen und die logistische Kette zu organisieren.

Nach einer Einspielphase wird eine Startphase auf das Jahr 2025 gesetzt. Für den **Betrachtungszeitraum** wird ein Zeitraum **von 20 Jahren von 2025 bis 2045** definiert. In diesem Zeitraum könnte der H₂-Container das Hochfahren einer Wasserstoffwirtschaft unterstützen und positiv beeinflussen.

Derzeit wird der European Hydrogen Backbone, ein europaweites Pipelinennetz für Wasserstoff aufgebaut. Das Netz soll bis 2030 europaweit 27.000 km Strecke und bis 2040 53.000 km umfassen. Es ist geplant, Großverbraucher zuerst anzuschließen. Mit einem Einsatz von Massengutschiffen für Wasserstoff, die jetzt geplant werden, ist erst in 10 Jahren zu rechnen.

Der Wasserstoffcontainer bietet daher Potential, diese Versorgungsstränge zu erweitern bzw. zu ergänzen.

5.1.2 H₂-Produktion

Die Produktionskosten für Wasserstoff in Euro/kg Wasserstoff fließen direkt in die Wasserstoffkosten für den Verbraucher ein.

In der folgenden Tabelle werden aktuelle Preise sowie Preise für 2030 und 2045/50 für die Wasserstoffproduktionskosten in „von-bis“-Preiskorridoren dargestellt. Die genannten Quellen haben Preise in diesen Korridoren angegeben.

Tabelle 5: H₂-Beschaffungskosten

	von	bis	Quellen
Preis heute	4,00 Euro	6,00 Euro	(Deutscher Bundestag, 2020), (Göbelbecker, 2022), (E-Bridge Consulting GmbH, 2023)
Preis 2030	2,33 Euro	4,50 Euro	(Deutscher Bundestag, 2020), (Podbregar, 2023)
Preis 2045/50	2,00 Euro	3,00 Euro	(Wietschel, 2023), (Deutscher Bundestag, 2020), (Podbregar, 2023)

In dem Betrachtungszeitraum von 2025 bis 2045 wird der **Preis auf 2,50 Euro pro kg H₂ gesetzt**. Dieser Preis liegt in dem Preiskorridor für 2030 und im Mittelfeld für 2045.

Für den Wasserstoffmarkt gibt es die Indizes Hydrex seit Januar 2021 und den Hydrix seit Mai 2023.

- Der täglich veröffentlichte Hydrex ist ein kostenbasierter Spotpreisindex für Wasserstoff, der die kurzfristigen Gestehungskosten zur Herstellung von grünem, blauem und grauem Wasserstoff berücksichtigt. Der Hydrex bietet eine Orientierung für mögliche Einkaufspreise – der Hydrex basiert nicht auf tatsächlichen Marktdaten. (E-Bridge Consulting GmbH, 2023)
- Der wöchentlich berechnete Hydrix ist ein marktbasierter Preisindex für Wasserstoff, der auf tatsächlichen Preisindikationen basiert. (European Energy Exchange AG, tagesaktuell)

Es wird angenommen, dass das Befüllen des H₂-Containers und das Verladen des vollen H₂-Containers auf das Transportmittel bzw. das Entladen des leeren H₂-Containers vom Transportmittel im Beschaffungspreis enthalten ist.

5.1.3 H₂-Containerkosten

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird angenommen, dass für das Geschäftsmodell der durchgehenden Versorgung von Verbrauchern eine erforderliche Anzahl an H₂-Containern beschafft wird. Die Summe der Investition der H₂-Container wird mit 4 % verzinst. Die Instandsetzung der H₂-Container wird mit 2 % der Investition angesetzt. Aufwendungen für eine Verkehrshaftpflichtversicherung und eine Transportversicherung werden mit 5.000 Euro pro Jahr angesetzt (Bidakovsky, 2023).

Die Hersteller von H₂-Containern sind mit Angaben sehr zurückhaltend. Alle Hersteller sind mit einer Fragebogenaktion auch zu Preisen angeschrieben worden. Bei den beiden Rückläufern wurden keine Angaben zu Preisen von H₂-Containern gemacht. Es gibt mündliche Aussagen zu Preisangaben von H₂-Containern, die z. B. für 40'-Container im oberen 6-stelligen Bereich liegen.

Eine allgemeinere Aussage besagt, dass mit 750 Euro pro Kilogramm der Wasserstoffkapazität eines H₂-Containers kalkuliert werden kann.

Nach einer mündlichen Aussage würden die Preise von H₂-Containern aufgrund der hohen Materialkosten des verwendeten Druckgasflaschen Typs 4 nicht stärker als um 5 % fallen. In dieser Studie wird angenommen, dass bei einer stärkeren Nachfrage nach H₂-Containern bzw. der Abnahme einer großen Anzahl von H₂-Containern ein Preisnachlass bis zu 20 % in der Serienfertigung unter Marktbedingungen möglich sein könnte. Dieser Nachlass wird auf die oben genannten 750 Euro pro Kilogramm der Wasserstoffkapazität eines H₂-Containers gerechnet. Daraus ergibt sich ein Preis von **600 Euro pro Kilogramm der Wasserstoffkapazität eines H₂-Containers**, der hier angesetzt wird.

In der folgenden Tabelle werden die betrachteten H₂-Containertypen mit der Wasserstoffkapazität dargestellt und die Preisspanne zwischen heutiger und realistischer Einschätzung angegeben:

Tabelle 6: Wasserstoffinhalt der betrachteten H₂-Container

H ₂ -Containertyp	20'	20'HC	40'	40'HC	45'HC
Inhalt [kg]	500	600	1.000	1.200	1.350
Preis heute mit 750 Euro/kg H ₂	375.000	450.000	750.000	900.000	1.012.500
Preis realistisch mit 600 Euro/kg H ₂	300.000	360.000	600.000	720.000	810.000

5.1.4 H₂-Containertyp

Aus der Tabelle 2, in der die von den Herstellern angegebenen, transportierten Wasserstoffmengen in H₂-Containern aufgelistet sind, werden maximale Angaben für deren Kapazität gewählt. Sind Angaben vorhanden, wurde von den Herstellern für H₂-Container mit einer hohen H₂-Kapazität ein Druck von 500 bar angegeben. Für die betrachteten Standardcontainer 20', 20'HC, 40' und 40'HC sowie den 45' Container in der High Cube Variante (45'HC) werden die in der folgenden Tabelle angegebenen H₂-Inhalte pro Container angesetzt.

Tabelle 7: Wasserstoffinhalt der betrachteten H₂-Containertypen

	20'	20'HC	40'	40'HC	45'HC
Druck [bar]	500	500	500	500	500
Inhalt [kg]	500	600	1.000	1.200	1.350

In den weiteren Untersuchungen werden für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur die Containertypen berücksichtigt, die im internationalen Seetransport als Standardcontainer transportiert werden. Der 45'HC-Container könnte in weiteren Untersuchungen, die ausschließlich innereuropäische Seeverkehre betrachten, berücksichtigt werden.

5.1.5 H₂-Transportkosten

Zu den Transportkosten gehören Kosten für Vor- und Nachlauf, für den Hauptlauf (abhängig von der Relation) und den Umschlag auf den Terminals.

Der Personalaufwand wird mit 100.000 Euro pro Jahr angesetzt.

5.1.5.1 Vor- und Nachlauf

Der Vorlauf und der Nachlauf des vollen H₂-Containers bzw. Der Vorlauf und der Hauptlauf des leeren H₂-Containers können mit Bahn, Binnenschiff oder Lkw durchgeführt werden.

Erste Experimente für unterschiedliche Standorte für den Wasserstoffimport per Seeschiff haben gezeigt, dass der relevante Preis je Kilogramm Wasserstoff für den Verbraucher aufgrund der hohen Kosten bei der Containeranschaffung sehr stark von der Umlaufzeit des Containers abhängt. Aus den aufgezeigten Beispielprozessen weist die Lkw-Seeschiff-Lkw-Kombination (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11) die kürzeste Umlaufzeit auf. In allen anderen Prozessen verlängern zusätzliche Stand- und Umschlagszeiten die Transportzeit zum Teil erheblich. Zudem besteht die Zielgruppe in erster Linie aus Kleinverbrauchern, bei denen kein Gleis- oder Binnenschiffsanschluss vorausgesetzt werden kann, so dass immer ein Lkw für die letzte Meile zusätzlich erforderlich wäre.

Um alle Berechnungen miteinander vergleichen zu können und so eine Aussage über die Wasserstoffkosten treffen zu können, wird in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung **Vor- und Nachlauf mit Lkw** für alle Berechnungen angenommen.

Um sich einem anzusetzenden Preis für Lkw-Transporte anzunähern, ist festzustellen, dass es keine allgemeingültigen Preisangaben gibt, da jeder Transporteur unterschiedlich kalkuliert. Auf jeden Fall ist die Entfernung ein wichtiger Faktor. Daher wird einerseits ein km-Preis angesetzt, um die Kosten für die Entfernung abzubilden, andererseits für jeden Auftrag ein Sockelbetrag angesetzt, um zusätzlich den Aufwand für kurze Strecken zu gewichten. Für Transporte von H₂-Containern (voll, leer) mit dem Lkw werden Kosten in der Spanne von 1,50 Euro bis 2,20 Euro pro km genannt. (MT Container GmbH, kein Datum) (containerbasis.de, kein Datum) (CIS + International GmbH, kein Datum) Üblicherweise werden beim Lkw-Transport nach der Anlieferung eines Containers die Kilometer bis zur nächsten Beladestelle als Kosten mit erhoben. Es wird hier aber davon ausgegangen, dass bei einer Anlieferung eines vollen H₂-Containers immer ein leerer H₂-Container aufgenommen werden kann. Die Transportkosten für den leeren H₂-Container werden dann als getrennter Auftrag mit km-Pauschale und Sockelbetrag angesetzt.

Die Lkw-Kosten werden **pro Kilometer mit 1,50 Euro** als normalen Preis und 2,20 Euro als hohen Preis angesetzt und pro Auftrag mit einem **Sockelbetrag von 150 Euro** belastet.

Für den Transport des H₂-Containers von der H₂-Produktionsstätte bis zum Exportterminal und der Entfernung des Importterminals zum Verbraucher wird jeweils eine **Strecke von 150 km** angenommen. Für den Transport werden 12 Stunden veranschlagt.

5.1.5.2 Hauptlauf und Referenzhäfen

Die Transportkosten für den Hauptlauf per Seeschiff sind am schwersten festzulegen, da je nach Start- und Zielhafen kein, ein oder mehrere Angebote vorliegen können. Es können direkte Relationen oder Rundreisen angeboten werden. Falls keine direkte Relation und keine Relation per Rundreise bestehen, könnte der Importhafen per Transshipment-Verkehr angebunden sein.

Zudem hängen die Transportkosten per Seeschiff von Angebot und Nachfrage, Kundenbeziehungen und Auftragsmengen ab.

Für den Hauptlauf wurden aus der ISL-Datenbank (2022) Referenzhäfen mit realen Relationen so ausgewählt, dass möglichst alle Kontinente und unterschiedliche Entfernungen betrachtet werden. Wurden keine Häfen identifiziert, die für einen Wasserstoffexport realistisch sind, wurden stellvertretende Häfen gewählt.

Für Bremerhaven besteht mit den Referenzhäfen Bergen, Reykjavik, Algeciras, New York, Port Said, Rio de Janeiro, Kapstadt und Jebel Ali eine Direktverbindung oder Bremerhaven ist auf einer Rundreise angebunden. Auf den Relationen Bremerhaven – Algeciras und Bremerhaven New York fahren jeweils 2 Schiffe mit unterschiedlichen Rundläufen. Für den Exporthafen Grangemouth wurde die Relation Rotterdam – Grangemouth und für den Exporthafen Agadir wurde die Relation Hamburg – Agadir betrachtet (Transshipmentverkehre wurden nicht betrachtet), da keine Relationen mit Bremerhaven bestehen.

Tabelle 8: Ausgewählte Referenzhäfen

Lfd. Nr.	Exporthafen (Port Code)	Land	Importhafen (Port Code)	Import [km]	Export [km]
1	Grangemouth (GBGRG)	Schottland	Rotterdam (NLRTM)	733	733
2	Bergen (NOBGO)	Norwegen	Bremerhaven (DEBRV)	1.321	982
3	Reykjavik (ISREY)	Island	Bremerhaven (DEBRV)	2.592	2.600
4	Algeciras (ESALG)	Spanien	Bremerhaven (DEBRV)	3.997	2.927
5	Agadir (MAAGA)	Marokko	Hamburg (DEHAM)	3.886	4.047
6	Port Said (EGPSD)	Ägypten	Bremerhaven (DEBRV)	6.802	7.261
7	New York (USNYC)	USA	Bremerhaven (DEBRV)	6.477	6.477
8	Rio de Janeiro (BRRIO)	Brasilien	Bremerhaven (DEBRV)	11.964	10.690
9	Jebel Ali (AEJEA)	VAE	Bremerhaven (DEBRV)	15.122	11.963
10	Kapstadt (ZACPT)	Südafrika	Bremerhaven (DEBRV)	12.969	15.152

Die folgende Tabelle enthält die Referenzhäfen mit Parametern auf der Reise, die als Grundlage für die Berechnungen herangezogen worden sind.

Tabelle 9: Referenzhäfen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

Refe- renzha- fen	Rund- lauf Häfen	Rund- laufzeit	Im-/Export aus Verbrauchersicht			Stopps auf See- reise	Dauer See- reise
			[I, E]	nach/ von	über die Häfen		
	[#]	[Tage]				[#]	[Tage]
GBGRG	2	3,5	I	NLRTM		0	1,3
	2	3,5	E			0	1,3
NOBGO	7	7,3	I	DEBRV	NOMAY, NOAES	2	2,2
	7	7,3	E		NOEGE, NOSVG, NOFUS	3	1,6
MAAGA	8	17,5	I	DEHAM	MAPTM, NLRTM	2	6,7
	8	17,5	E		BEANR, FRLEH, MAPTM, MACAS	4	6,9
ISREY	6	12,8	I	DEBRV	NLRTM	1	4,4
	6	12,8	E		NLRTM	1	4,5
ESALG*	9	53,1	I	DEBHV	NLRTM, GBLGP	2	6,0
	10	53,0	E		NLRTM	1	5,0
EGPSD	6	27,3	I	DEBRV	GBLGP, NLRTM	2	11,7
	6	27,3	E		ILASH, EGALY	2	12,5
USNYC**	9	42,8	I	DEBHV		0	11,2
	7	43,5	E			0	11,2
BRRIO	19	57,0	I	DEBHV	BRSSA, BRPEC, MAPTM, NLRTM, GBLGP	5	20,5
	19	57,0	E		DEHAM, BEANR, FRLEH, PTSIE	4	18,4
Kapstadt	9	53,0	I	DEBHV	MAPTM, NLRTM, GBLGP	3	22,4
	9	53,0	E		NLRTM, ESALG, ZAPLZ, ZADUR	4	26,2
Jebel Ali	14	53,6	I	DEBHV	AEKHL, PKQCT, INNSA, INMUN,	8	26,0

			SAJED, MAPTM, GBSOU, NLRTM		
14	53,6	E	BEANR, FRLEH, ESALG, SAJED	4	20,6

* Auf der Verbindung fährt ein Schiff die Rundreise über Oman, Sri Lanka und Saudi Arabien, das andere Schiff fährt die Rundreise über Südafrika. Es wird jeweils die "günstige" Import-/Exportverbindung gewählt.

** Auf der Verbindung fährt ein Schiff den Ostseeraum und zwei weitere US-Häfen an, das andere Schiff fährt Westeuropa und 4 weitere US-Häfen an. Es wird jeweils die "günstige" Import-/Exportverbindung gewählt.

Die Reihenfolge der Referenzhäfen in der Tabelle entspricht der Reihenfolge, die sich in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergeben hat.

Die Schiffe fahren Export- und Importhafen auf einer Rundreise an, Ausnahme ist die Relation Rotterdam – Grangemouth mit einer Direktverbindung. Dies kann in der Spalte „Häfen auf Reise“ abgelesen werden. Für Grangemouth wird eine „2“ angegeben, die sich genau auf die Häfen Rotterdam und Grangemouth bezieht. Entsprechend wird in der Spalte „Stopps auf Seereise“ eine „0“ angegeben. Für die Relation Bremerhaven – New York ist zwar in der Spalte „Stopps auf Seereise“ eine „0“ angegeben, jedoch signalisieren die Ziffern „9“ (Import) und „7“ (Export) in der Spalte „Häfen auf Reise“, dass jeweils ein Schiff direkt von New York nach Bremerhaven und umgekehrt fährt, aber auf der Rundreise weitere Häfen angelaufen werden. Die „Rundlaufzeit“ gibt an, welche Reisezeit das Schiff ohne Stopps benötigt, um alle Häfen seiner Rundreise anzufahren.

Die Spalten „Im-/Export aus Verbrauchersicht“, „Stopps auf Seereise“ und „Dauer Seereise“ beziehen sich auf den Seetransport des Referenzhafens (z. B. Grangemouth) zum Zielort (z. B. Bremerhaven) je für Export- und Importrichtung. Die „Dauer Seereise“ gibt die Zeitdauer an, die vom Starthafen zum Zielhafen für die reine Seereise erforderlich ist.

Die „Rundlaufzeit“ beinhaltet die „Dauer Seereise“ plus die Dauer der weiteren Rundreise und die Dauer für die Hafenstopps.

Im Anhang Rundreisen der Referenzhäfen sind für die Referenzhäfen alle Häfen aufgelistet, die auf der gesamten Rundreise angefahren werden.

Für die Transportkosten und -dauern per Seeschiff wurden **Daten von November 2023 aus dem Online-Marktplatz SEARATES** erfasst (DP World, kein Datum). Die Preise bewegten sich Ende 2023 auf dem Niveau von vor Beginn der Covid-19 Pandemie (MacroMicro, 2023).

Mit den Angriffen auf die Handelsschifffahrt im Roten Meer und der Meidung des Suezkanals haben sich die Kosten für die Containerschifffahrt in diesem Bereich erhöht. Dies betrifft u.a. die Relation Bremerhaven – Jebel Ali, auf der die Kosten für die Seereise Schwankungen unterliegen und höher ausfallen können.

5.1.5.3 Umschlag Terminals

Für die Ermittlung der Umschlagskosten in Bremerhaven wurden die **Umschlagsgebühren der Terminals** EUROGATE (Preis- und Konditionsverzeichnis) und NTB (Referenztarif) gemittelt. (EUROGATE, 2023) (NTB, 2022). Eventuell mögliche Sonderkonditionen sind hierin nicht enthalten.

Die Ermittlung der Umschlagskosten an den entsprechenden Exportterminals für volle H₂-Container bzw. den Importterminals für die zurückgehenden leeren H₂-Container wurden mit dem **Online-Marktplatz SEARATES** ermittelt. (DP World, kein Datum)

Die Standzeiten auf den Terminals bzw. die Dauer bis ein H₂-Container beladen oder gelöscht worden ist, wird mit durchschnittlich 12 Stunden angesetzt.

5.1.6 H₂-Handling beim Verbraucher

Für die Anlieferung eines vollen H₂-Containers und die Abholung eines leeren H₂-Containers beim Verbraucher sind die folgenden Konzepte möglich:

- Lkw mit Be- und Entladevorrichtung für Container
- Mehrere Stellplätze für eine Lösung mit Trailern
- Stationärer Kran beim Verbraucher für die Be- und Entladung von H₂-Containern auf/von Containerchassis
- Wasserstoffspeicher beim Verbraucher, um den gelieferten Wasserstoff aus dem H₂-Container umzufüllen

Welches Konzept für welchen Verbraucher geeignet ist, muss im Einzelfall entschieden werden.

In dieser Untersuchung werden diese Konzepte nicht weiter untersucht.

5.1.7 H₂-Kosten für Verbraucher

Die Kosten für den Beschaffungspreis von Wasserstoff im Jahr 2030 werden mit 2,33 Euro bis 4,50 Euro pro kg Wasserstoff benannt (siehe Tabelle 5: H₂-Beschaffungskosten). Die Preise schwanken dabei entsprechend der regionalen Bedingungen, z. B. zur Bereitstellung des erforderlichen Stroms.

Die Boston Consulting Group (BCG) nimmt sogar an, dass Wasserstoff in der Herstellung in Deutschland ab 2030 nicht bei 3 Euro, sondern 5 bis 8 Euro kosten könnte (Preise bis 10 Euro pro Kilogramm Wasserstoff seien möglich). (Karzick, 2023)

Zusätzlich zu dem Beschaffungspreis des Wasserstoffs kommen u. a. Transportkosten und Kosten, die durch den H₂-Container entstehen, dazu.

Beispiele für angebotene Wasserstoffpreise:

- Wasserstoff, erzeugt aus Strom von Offshore-Windenergieanlagen, könnte mit ca. 8 Euro pro Kilogramm im Rahmen von NorthH₂ Bremerhaven angeboten werden. (Wellbrock, 2024) Für eine Versorgung von Verbrauchern erhöht sich der Preis durch den erforderlichen Transport zum Verbraucher.
- Der Tankstellenbetreiber H₂ Mobility hatte zum 1. Oktober 2023 ein neues Preismodell für Wasserstofftankstellen angekündigt, in welchem Preise von 9,00 Euro (grüner Wasserstoff, 350 bar) bis 15,25 Euro (grauer Wasserstoff, 700 bar) genannt wurden. (Schaal, 2023) Aktuell (April 2024) wird Wasserstoff an öffentlichen Tankstellen üblicherweise zu Preisen zwischen ca. 10 und 16 Euro pro Kilogramm angeboten. Grüner Wasserstoff wird dabei günstiger als grauer Wasserstoff angeboten, obwohl der Beschaffungspreis höher liegt. Auch eine geringere Druckstufe (350 bar statt 700 bar) führt zu einem etwas niedrigeren Preis. Hier wird der Preis des grünen Wasserstoffs subventioniert. Die genannten Preise sind

Endverbraucherpreise. Im Sinne des Projektes sind die Tankstellenbetreiber die Verbraucher, d. h. der Wasserstoffpreis für den Verbraucher liegt noch darunter.

- Herr Andreas Schierenbeck, Vorstand des Start-Ups HH2E AG, setzt auf die Erzeugung von Wasserstoff bei Stromüberangebot mit Strom zu günstigen Preisen von der Börse. Dabei nennt Herr Schierenbeck einen Abgabepreis von 10 Euro bis 15 Euro pro Kilogramm Wasserstoff und einem Betriebsbeginn ab Mitte 2025. (Lohmann, 2023) Für eine Versorgung von Verbrauchern erhöht sich der Preis durch den erforderlichen Transport zum Verbraucher.

Für diese Studie wird angenommen, dass importierter Wasserstoff, ggf. mit der Option einer Subventionierung (die zu klären ist), **bis zu einem Preis von 15 Euro pro Kilogramm** konkurrenzfähig sein könnte.

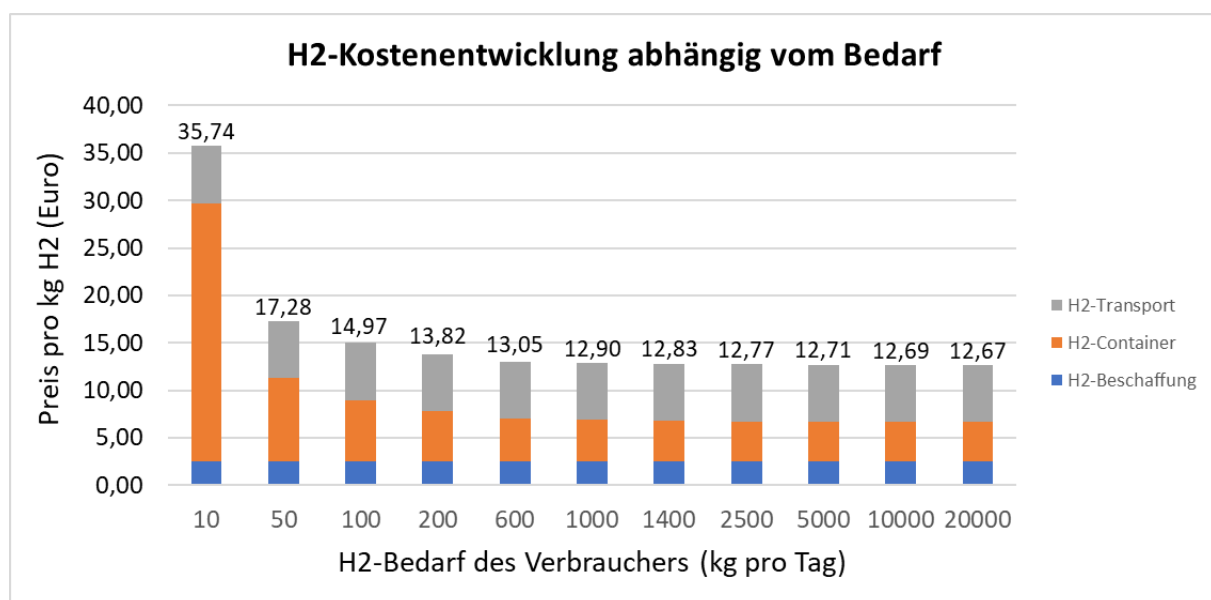
5.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden Voraussetzungen für eine Tragfähigkeit von containerisierten Wasserstofftransporten untersucht.

Bedarf des Verbrauchers

Je höher der H₂-Bedarf eines Verbrauchers ist, desto geringer sind die H₂-Kosten. Dieser Effekt wird, gerechnet mit dem 40'HC-Container mit 1.200 kg Wasserstoffinhalt, in der folgenden Abbildung anhand der Relation Bremerhaven/Bergen dargestellt.

Abbildung 12: H₂-Kostenentwicklung abhängig vom Bedarf (Relation Bremerhaven/Bergen)



Wird der Bedarf des Verbrauchers im Verhältnis zum Inhalt des H₂-Containers sehr klein, steigt die H₂-Kosten exponentiell an. Durch den geringen Bedarf des Verbrauchers und der großen Menge Wasserstoff im H₂-Container kommt es zu einer langen Standzeit des Containers. Dadurch steigt der Anteil der Kosten „H₂-Container“.

Ist der Bedarf des Verbrauchers im Verhältnis zum Inhalt des H₂-Containers z. B. ein Vielfaches, ist ungefähr dieses Vielfache als Anzahl Anlieferungen pro Tag notwendig. Je mehr H₂-

Containerbewegungen pro Tag (Anlieferungen von vollen H₂-Containern, Abholungen von leeren H₂-Containern) erforderlich sind, desto stärker hängt es von den örtlichen Gegebenheiten ab, ob eine Containerlösung praktikabel ist.

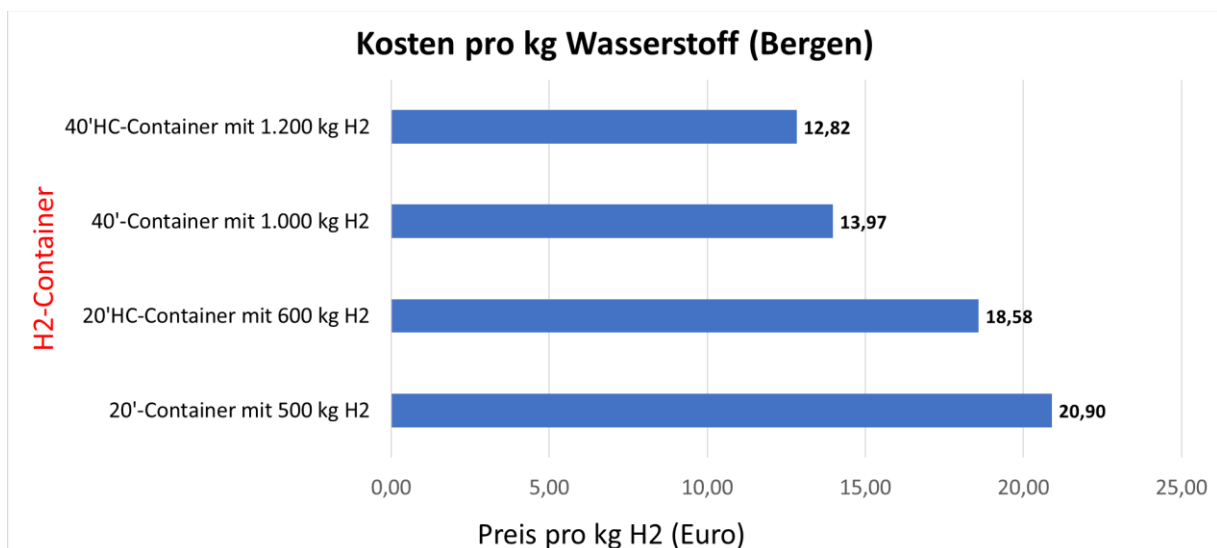
Als exemplarische H₂-Bedarfe werden **200 kg, 600 kg, 1.000 kg und 1.400 kg Wasserstoffverbrauch pro Tag** betrachtet.

H₂-Containertyp

Als typische H₂-Container werden die H₂-Containertypen 20', 20'HC, 40' und 40'HC mit 500, 600, 1.000 und 1.200 kg Wasserstoffinhalt angeboten.

In dem folgenden Diagramm werden für die Relation Bremerhaven/Bergen die Kosten pro Kilogramm Wasserstoff für die untersuchten H₂-Containertypen dargestellt.

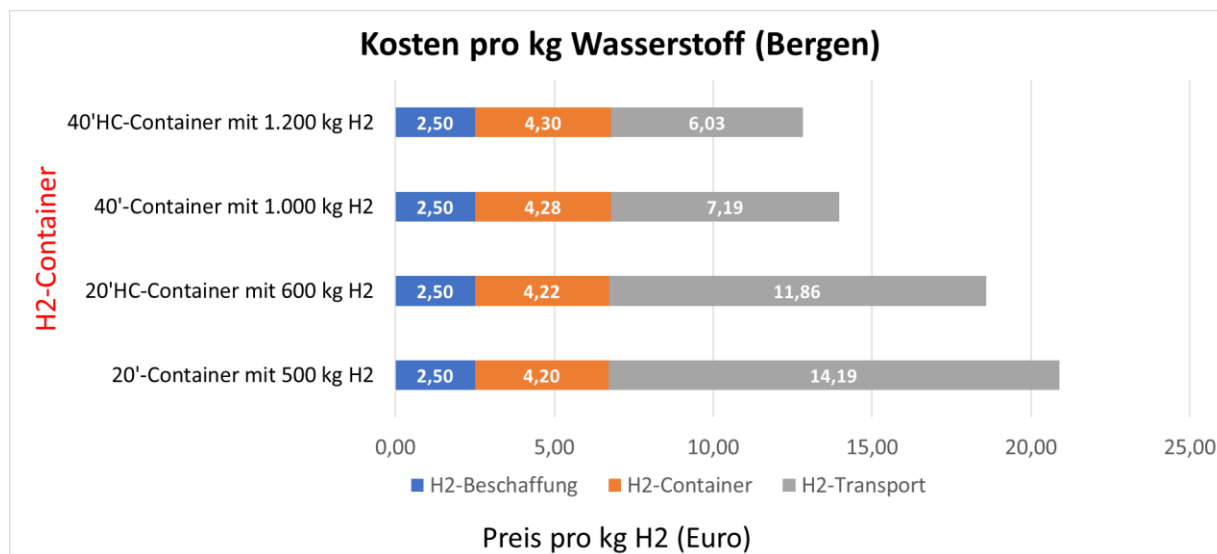
Abbildung 13: Kosten pro kg Wasserstoff je H₂-Containertyp (Relation Bremerhaven/Bergen)



Das Diagramm zeigt, dass der 40'HC-Container mit 1.200 kg Wasserstoffkapazität das beste Ergebnis liefert. Dies ist auch naheliegend, da z. B. bei halber Kapazität der H₂-Container zwar günstiger ist, aber die doppelte Menge an Containern transportiert werden muss.

In dem folgenden Diagramm werden für die Relation Bremerhaven/Bergen die Kosten pro Kilogramm Wasserstoff für die untersuchten H₂-Containertypen mit den Kostenanteilen H₂-Beschaffung, H₂-Container und H₂-Transport dargestellt.

Abbildung 14: Kostenanteile pro kg Wasserstoff je H₂-Containertyp (Relation Bremerhaven/Bergen)



Das Diagramm mit den Kostenanteilen bestätigt diesen Effekt: Bei dem 40'HC-Container mit 1.200 kg Wasserstoffkapazität ist der Kostenanteil des H₂-Containers zwar etwas höher als bei den anderen H₂-Containertypen, aber der Kostenanteil H₂-Transport hat sich beispielsweise gegenüber dem H₂-Container mit halber Kapazität (20'HC-Container) fast verdoppelt.

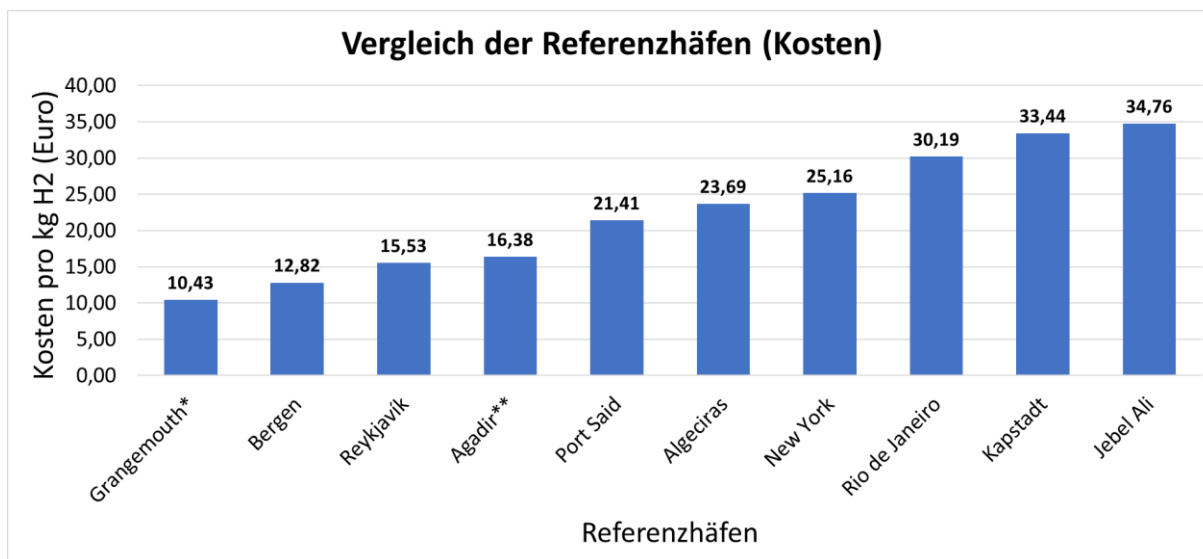
Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird im Folgenden der **Wasserstoffimport mit dem 40'HC-Container mit 1.200 kg Wasserstoffkapazität** untersucht.

Referenzhäfen – Kosten pro kg Wasserstoff

Um eine Aussage über eine ökonomische Tragfähigkeit des verfolgten Ansatzes treffen zu können, wird unter realistischen Bedingungen ermittelt, für welche der 10 definierten Referenzhäfen sich ein Import von Druckwasserstoff wirtschaftlich rechnen könnte.

In dem folgenden Diagramm werden die erwarteten Kosten pro Kilogramm Wasserstoff für 40'HC-Container mit 1.200 kg Wasserstoffkapazität für die Referenzhäfen dargestellt.

Abbildung 15: Vergleich der Referenzhäfen



* Relation Grangemouth/Rotterdam; per Lkw in die Region Bremerhaven

** Relation Agadir/Hamburg; per Lkw in die Region Bremerhaven

Die Relationen Rotterdam/Grangemouth und Bremerhaven/Bergen liegen im Preisniveau bis 15 Euro pro kg Wasserstoff.

Ergebnis ist, dass ein Import aus Grangemouth (Schottland) am wirtschaftlichsten betrieben werden könnte. Das gute Ergebnis basiert auf der Direktverbindung mit dem Hafen Rotterdam und der damit verbundenen kurzen Umlaufzeit eine H₂-Containers. Der Weitertransport in die Region Bremerhaven (Nachlauf) wurde mit einem Lkw betrachtet.

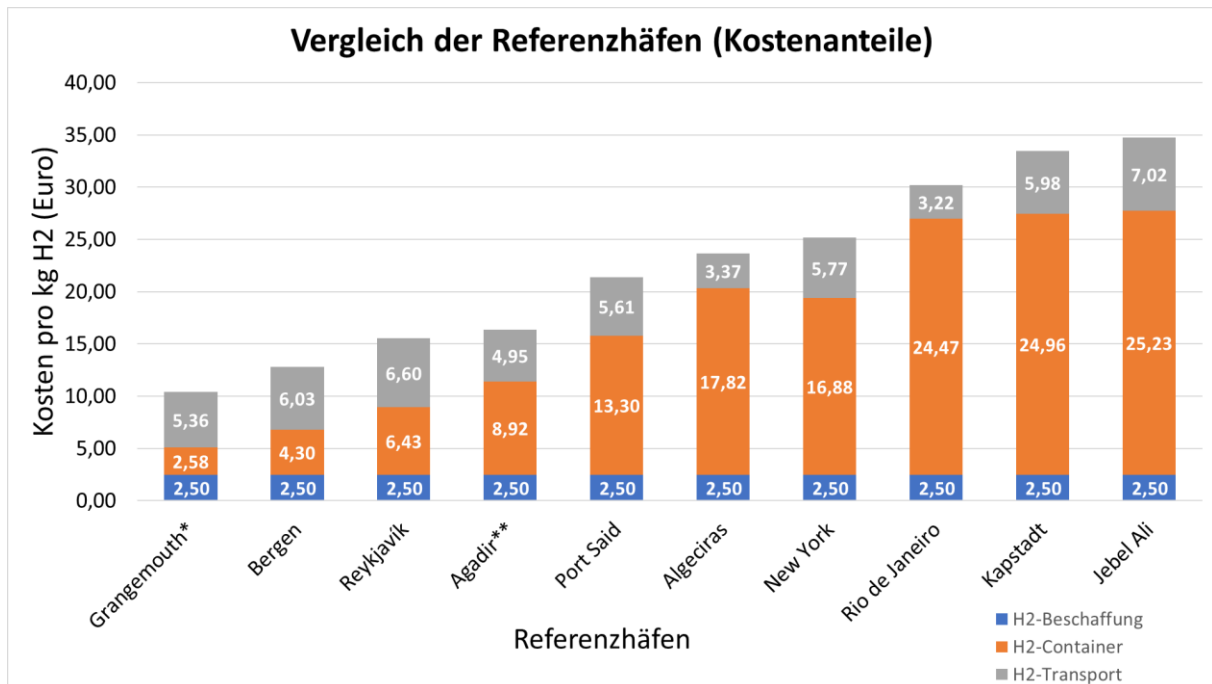
Ein gutes Ergebnis ergibt die Relation Bremerhaven/Bergen. Diese Verbindung wird von einem Schiff auf einer Rundreise mit zwei weiteren Hafenanläufen auf der Fahrt nach Bremerhaven und drei weiteren Hafenanläufen auf der Fahrt nach Bergen bedient. Die Umlaufzeit ist ca. doppelt so lang wie die Verbindung nach Schottland.

Die weiteren Relationen liegen über der gesetzten Marke von 15 Euro.

Referenzhäfen – Kostenanteile pro kg Wasserstoff (H₂-Beschaffung, H₂-Container, H₂-Transport)

Entsprechend der Bedingungen der Relationen setzen sich die Kostenanteile H₂-Beschaffung, H₂-Container und H₂-Transport in unterschiedlichen Verhältnissen zusammen. Das folgende Diagramm zeigt den Vergleich der Referenzhäfen mit den Kostenanteilen.

Abbildung 16: Vergleich der Referenzhäfen mit Kostenanteilen H₂-Beschaffung, H₂-Container, H₂-Transport



H₂-Beschaffung

Die Kosten für die H₂-Beschaffung, also der Einkaufspreis für Wasserstoff vom Produzenten wurde für alle Referenzhäfen auf 2,50 Euro gesetzt. Bei einem anderen Preis ändert sich die Kosten pro kg Wasserstoff um genau diesen Betrag.

H₂-Container

Die Kosten der eingesetzten H₂-Container werden in der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung entsprechend der Rundlaufzeit einer Relation auf das Kilogramm Wasserstoff im Kostenanteil H₂-Container umgelegt. Bei einer längeren Rundlaufzeit sind bei sonst gleichen Bedingungen mehr H₂-Container erforderlich, um eine kontinuierliche Versorgung eines Verbrauchers zu gewährleisten.

Der Kostenanteil H₂-Container bei der Relation Bremerhaven/Port Said liegt über dem Anteil der Relation Bremerhaven/Algeciras, da auf der Relation Bremerhaven/Algeciras die Rundreise länger dauert.

Bei den (wirtschaftlich) besseren Relationen liegen die Kostenanteile für H₂-Container unterhalb der Kostenanteile für den H₂-Transport. Steigen die Rundlaufzeiten, steigt insbesondere der Kostenanteil H₂-Container, so dass sich die Gewichtung umkehrt.

H₂-Transport

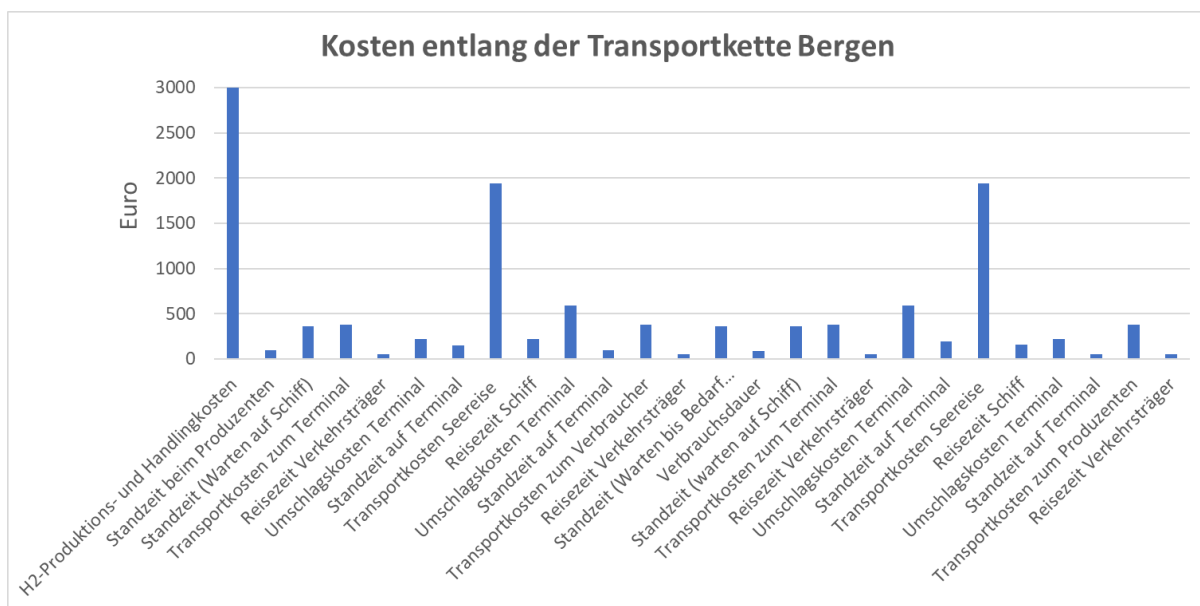
Der Kostenanteil H₂-Transport hängt stark von den Kosten für den Seetransport und den Umschlagskosten an den Terminals ab. Die Kosten für den Seetransport und die Umschlagskosten können, abhängig von der Relation, variieren. Auch die Transportkosten für den leeren H₂-Container können sich stark von den Transportkosten für den vollen Container unterscheiden. Insbesondere die Frachtkosten hängen stark von Angebot und Nachfrage ab.

5.3 Kosten entlang der Transportkette

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden die Kosten H₂-Beschaffung, H₂-Container und H₂-Transport zugeordnet.

In diesem Kapitel werden die Kosten entlang der Transportkette abgebildet, um beispielhaft einschätzen zu können, welche Kostenblöcke die größten Anteile haben. In der folgenden Abbildung werden die Kosten für die Relation Bremerhaven/Bergen dargestellt.

Abbildung 17: Kosten entlang der Transportkette Relation Bremerhaven/Bergen



Auffällig sind die Kostenbereiche H₂-Produktions- und Handlingkosten sowie die Frachtkosten für den vollen und leeren H₂-Container. Der dritte bedeutende Kostenbereich sind die Stand- und Reisezeiten des Containers, die in den Kostenanteil H₂-Container fließen.

Für andere Relationen, bei denen die Rundreisezeit eines H₂-Container länger ist, steigt auch der Kostenanteil H₂-Container.

5.4 Perspektiven hinsichtlich Kosten, Produktionskapazitäten und Gewicht von Wasserstoffcontainern

Hinweise von Herstellern, dass „auf Nachfrage“ auf individuelle Wünsche eingegangen werden kann, deuten darauf hin, dass eine Standardisierung noch nicht erfolgt ist und die Produktion in Einzelfertigung erfolgt. Bei einem Markthochlauf ist eine Standardisierung (Druckstufe, Wasserstoffinhalt, Anschlüsse) erforderlich, um eine Serienfertigung zu ermöglichen. Eine Serienfertigung würde die Produktionskosten senken und auch die Kosten für Zertifizierungen, z. B. für eine Seezulassung, reduzieren.

Die Produktionskapazitäten könnten mit einer Standardisierung und der Fertigung in Serie hochgefahren werden.

Für den Transport großer Wasserstoffmengen (ca. 1.200 kg bei 500 bar) in 40'HC-H₂-Containern werden derzeit Druckgasflaschen Typ 4 verbaut. Die Druckbehälter werden weiterentwickelt.

So nennt das Technologieunternehmen Cevotec GmbH eine Gewichtsreduzierung um 15 % von Druckbehältern, indem 15 % des Fasermaterials eingespart werden konnten. Das führt zu einer Kosteneinsparung und mehr Speichervolumen für den transportierten Wasserstoff. (Lohse, 2024)

Das Unternehmen COVESS nv produziert Thermoplasttanks für verschiedene Anwendungen, die vollständig recycelbar sind. COVESS gibt für diese Druckbehälter (Type 5 Tanks) an, dass durch eine geringere Wandstärke von etwa 20 % eine Gewichtsreduzierung um etwa 20 % erreicht werden konnte. Für einen 40'HC-Container wird angegeben, dass 1.500 kg Wasserstoff bei einem Druck von 700 bar transportiert werden können; dies entspricht ca. 1.200 kg bei 500 bar Druck. (Vanswijgenhoven, 2024)

Die Bundesanstalt für Materialforschung- und -prüfung (BAM) forscht an der Optimierung von Wasserstoff-Druckbehältern, die aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen hergestellt werden. In dem Projekt, das von der RWTH Aachen koordiniert wird, sollen die Druckbehälter bei der Herstellung durch digitale Prozessüberwachung mit 20 % weniger Material hergestellt werden können. Durch den geringeren Materialeinsatz fällt die CO₂-Bilanz besser aus und durch die digitale Prozessüberwachung lassen sich Druckgasbehälter herstellen, die sicherer sind. Darüber hinaus deuten mechanische und thermische Belastungstests an, dass die Drucktanks 10 Jahre länger genutzt werden könnten. (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 2023)

6. Möglichkeiten und Grenzen von H₂-Containern

In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten und Grenzen H₂-Containern anhand einer SWOT-Analyse dargestellt. Es wird beschrieben, welche Vor- und Nachteile H₂-Container haben bzw. welche Stärken und Schwächen das Handling von H₂-Containern hat.

Insbesondere werden in einem zweiten Schritt Grenzen des Transports und Umschlags von großen Mengen von H₂-Containern betrachtet.

Abschließend wird in diesem Kapitel eine Einordnung vorgenommen, welche Bedeutung H₂-Container für eine Versorgung von Verbrauchern haben können.

6.1 Stärken und Schwächen des Einsatzes von H₂-Container

Für das in PROVIDE vorgesehene Konzept sind H₂-Container für den Transport von Wasserstoff vorgesehen. In diesem Kapitel werden Stärken und Schwächen von H₂-Containern beschrieben.

Stärken

- H₂-Container sind kurzfristig verfügbar
- Transport von Gefahrgutcontainern ist etabliert; Abfertigung in Containerterminals ist Tagesgeschäft
- Bestehende Transportketten können genutzt werden (See- und Binnenschifffahrtsstraßen, Straßen, Schienen)
- H₂-Container werden mit Straßenzulassung angeboten

- Wasserstoff in H₂-Containern kann vom Produzenten bis zu jedem Verbraucher transportiert werden
- Am wirtschaftlichsten für die Versorgung von kleinen und mittleren Verbrauchern; für größere Verbraucher ist die Nutzung als Einstieg in die Wasserstofftechnologie möglich
- H₂-Container können als Lager eingesetzt werden

Schwächen

- H₂-Container werden in Einzelfertigung hergestellt; dadurch eingeschränkte Verfügbarkeit größerer Mengen durch begrenzte Produktionskapazitäten
- Nicht alle Hersteller bieten eine Seezulassung von H₂-Containern an, teilweise wird eine Seezulassung nur auf Nachfrage angeboten
- Hoher Preis von H₂-Containern; lange Standzeiten wirken sich negativ aus
- Als Gefahrgut unterliegen H₂-Container zusätzlichen Sicherheitsvorschriften
- Für reine H₂-Containerschiffe gibt es prototypische Entwürfe mit Absichtserklärungen und langer Bauzeit
- Für reine H₂-Containerschiffe ist eine Nutzung großer Mengen an H₂-Containern Voraussetzung
- Hohes Gewicht von H₂-Containern

6.2 Transport und Umschlag großer Mengen von Wasserstoffcontainern

Die Anzahl von H₂-Containern, die an Bord regulärer Containerschiffe transportiert werden dürfen, hängt zunächst von der Art und der Größe der H₂-Container ab. Allgemein dürfen H₂-Container mit Druckwasserstoff (Gefahrgutcontainer der Klasse 2.1) nur in bestimmten Bereichen des Schiffes gestaut werden. Diese Bereiche müssen gut belüftet und mit geeigneten Brandschutz- und Notfallmaßnahmen ausgestattet sein.

Wo in einem Containerschiff geeignete Stellplätze für Gefahrgutcontainer der Klasse 2.1 festgelegt werden, muss für jedes Schiff im Einzelfall geprüft und genehmigt werden. Sind diese Bereiche definiert, teilen sich H₂-Container den Platz mit anderen Containern derselben Gefahrgutklasse.

Gen2 Energy AS hat einen Vertrag mit Sirius Design & Integration AS gezeichnet, um zwei Spezialschiffe ausschließlich für den Transport großer Mengen von H₂-Containern zu designen. Die geplanten Schiffe sollen bei einer Länge von 190 Metern eine Kapazität von 1.000 TEU für 500 40'-Container haben. (Gen2 Energy, 2022)

In Containerterminals erfolgt die Zwischenlagerung von Gefahrgutcontainern vor allem im Freien auf dafür ausgewiesenen Stellplätzen, die für die Lagerung von Gefahrgütern geeignet sind. Dabei wird z. B. in Bremerhaven mit Hafenbehörde und Feuerwehr vereinbart, nach welchem Raster Container abgestellt werden: z. B. wird festgelegt, dass die Türen der Container immer erreichbar sind, um im Gefahrenfall schnell handeln zu können. (EUROGATE, M. Kuschowsky, 2022)

Für Bremerhaven wird beim Umschlag ein Anteil von 4 % an Gefahrgutcontainern angenommen. Dies entspricht dem Gefahrgutcontaineranteil in Wilhelmshaven (EUROGATE, M. Kuschowsky, 2022).

Im Jahr 2022 wurden in Bremerhaven 4,6 Millionen TEU Container umgeschlagen. Bei einem Anteil von 4 % entspricht das 184.000 TEU in Gefahrgutcontainern pro Jahr. Würde die Versorgung für einen Verbraucher mit einem Bedarf von 1.200 kg Wasserstoff pro Tag mit 40'HC-Containern mit 1.200 kg Wasserstoffinhalt gedeckt, ergäben sich dadurch insgesamt 730 (1.460 TEU) zusätzliche Gefahrguttransporte pro Jahr für den Import des vollen und den Export des leeren H₂-Containers, der ohne Reinigung als Gefahrgutcontainer behandelt werden muss [siehe Kapitel 3.1]. Um zum Beispiel den Anteil der Gefahrgutcontainer am Umschlag um 20 % zu erhöhen, wären 36.800 zusätzliche TEU erforderlich. Das entspricht ca. 50 Verbrauchern mit einem Bedarf von 1.200 kg Wasserstoff pro Tag.

Um eine große Zahl von H₂-Containern auf Terminals umzuschlagen, sind organisatorische Lösungen denkbar. Z. B. wäre es möglich, Stellflächen nur für H₂-Container auszuweisen. Die Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV) regelt u.a. auch die Bestimmungen für die Lagerung sowie die Be- und Entladung von Wasserstoff. So ist bis zu einer Menge von drei Tonnen hierfür keine Genehmigung notwendig. Für eine Menge von mehr als drei Tonnen gibt es nach §19 BImSchG ein vereinfachtes Verfahren. Erst ab einer Menge von 30 Tonnen wäre ein Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung notwendig (Töpfer, 2022). Ob diese Grenzen ebenfalls auf den Umschlag von Wasserstoffcontainern im Hafenbereich zutreffen, wäre zu prüfen.

6.3 Bedeutung von Wasserstoffcontainern für die Versorgungssicherheit

Mit H₂-Containern können Verbraucher versorgt werden, die noch nicht an eine Wasserstoff-Pipeline angeschlossen sind oder werden. Da H₂-Container als Standardcontainer weltweit transportiert werden können, erfordert eine Versorgung mit Wasserstoff in containerisierter Form einen Straßen-, Bahn- oder Binnenwasserstraßenanschluss. Dabei sind Bahn und Binnenschiff eher für eine Versorgung mit größeren Mengen geeignet.

Falls sich ein Versorgungssystem mit H₂-Containern etabliert, sollte Wasserstoff von mehreren Exportorten über verschiedene Importverbindungen importiert werden. Damit wäre eine tägliche Versorgung mit H₂-Containern möglich, sodass Standzeiten von vollen und leeren H₂-Containern reduziert werden können. Zudem würde dadurch die Versorgungssicherheit mit Wasserstoff erhöht.

Für größere Verbraucher besteht mit der H₂-Containerlösung die Möglichkeit, prototypisch einen Wasserstoffbetrieb zu testen.

Literaturverzeichnis

- Agora Industrie und TU Hamburg. *Wasserstoff-Importoptionen für Deutschland*;
https://static.agora-energielende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-12-10_Trans4Real/A-EW_306_SNG_Imports_WEB.pdf (14.09.2023).
- Bidakovsky, V. *Verkehrshaftpflichtversicherung*
<https://www.finanz-und-versichern.de/verkehrshaftpflichtversicherung-vor-und-nachteile-im-ueberblick-ist-sie-wirklich-sinnvoll/> (abgerufen am 23.04.2023).
- Buljan, A. *Aker Presents Massive Offshore Wind-to-Hydrogen Project in Scotland at COP26*;
<https://www.offshorewind.biz/2021/11/04/aker-presents-massive-offshore-wind-to-hydrogen-project-in-scotland-at-cop26/> (abgerufen 11/2023)
- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. *BAM entwickelt in einem Gemeinschaftsprojekt Druckspeicher mit besserer CO₂-Bilanz*;
<https://www.bam.de/Content/DE/Pressemitteilungen/2023/Energie/2023-07-14-wasserstoff-co2-bilanz.html> (abgerufen am 08.08.2023).
- Bundesministerium der Justiz. *Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV), Anhang 2 Stoffliste zu Nr. 9.3 des Anhangs 1*;
https://www.gesetze-im-internet.de/bimsv_4_2013/anhang_2.html (abgerufen 11/2023)
- Bundesministerium der Justiz. *Anlage zur Bekanntmachung der Neufassung der Anlagen A und B zu dem Übereinkommen vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)*;
https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#__bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl221024_Anlageband.pdf%27%5D__1682576919018 (abgerufen 11/2023)
- Bundesministerium der Justiz. (n.d.). *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG), § 19 Vereinfachtes Verfahren*;
https://www.gesetze-im-internet.de/bimsg/_19.html (abgerufen 11/2023)
- Bundesministerium der Justiz. (n.d.). *Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV), § 18 Erlaubnispflicht*;
https://www.gesetze-im-internet.de/betrsv_2015/_18.html (abgerufen am 20.10.2023)
- Bundesministerium für Bildung und Forschung. *Wie TransHyDE eine Wasserstoff-Infrastruktur entwickeln will*;
<https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/transhyde> (abgerufen 08/2023)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). *Die Nationale Wasserstoffstrategie*;
https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile (abgerufen am 19.04.2024)

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. *900 Millionen Euro für Wasserstoffprojekt H₂Global*;
<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/12/20211223-900-millionen-euro-fuer-wasserstoffprojekt-h2global.html> (abgerufen am 20.03.2024)

Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. *IMDG-Code 2020*;
https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/Gefahrengut/imdg-code-de-2020.pdf?__blob=publicationFile (abgerufen am 15.12.2023)

BusinessPortalNorwegen. *Mongstad wird Standort für erste Wasserstofffabrik für die Schifffahrt in Norwegen*;
<https://businessportal-norwegen.com/2020/05/11/mongstad-wird-standort-fuer-erste-wasserstofffabrik-fuer-die-schifffahrt-in-norwegen/> (abgerufen am 19.04.2024)

BusinessPortalNorwegen. *Eviny, Equinor, und Air Liquide stoppen Wasserstoffprojekt in Norwegen*;
<https://businessportal-norwegen.com/2022/03/04/eviny-equinor-und-air-liquide-stoppen-wasserstoffprojekt-in-norwegen/> (abgerufen am 19.04.2024)

CIS + International GmbH. *Container Spedition für Transporte zwischen West- und Osteurop*;
<https://www.cis-international.de/container-spedition> (abgerufen am 27.11.2023)

containerbasis.de. *Wie belastbar ist ein Seecontainer?*
<https://www.containerbasis.de/blog/allgemein/belastbarkeit-seecontainer/> (abgerufen am 04.12.2023)

Containerbasis.de. *Container Transport – Möglichkeiten & Überblick*
<https://www.containerbasis.de/container-transport/> (abgerufen am 27.11.2023)

Deutsch-Dänische Handelskammer. *Erneuerbare Energien in Island: Know-How aus Tradition und Testlabor für neue Technologien*;
<https://www.handelskammer.dk/newsroom/newsletter/erneuerbare-energien-in-island-know-how-aus-tradition-und-testlabor-fuer-neue-technologien> (abgerufen am 19.04.2024)

Deutscher Bundestag. *Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff*;
<https://www.bundestag.de/resource/blob/691748/01a954b2b2d7c70259b19662ae37a575/WD-5-029-20-pdf-data.pdf> (03.04.2020).

Dose, A. *Wasserstoff von der Insel*;
<https://www.erneuerbare-energien-hamburg.de/de/blog/details/wasserstoff-von-der-insel.html> (abgerufen am 19.04.2024)

DP World. *Online Freight Marketplace*;
<https://www.searates.com/freight/> (abgerufen am 27.11.2023)

- DS Consulting GmbH. *Schottische Wasserstoffexporte nach Deutschland*;
<https://www.schottland.de/scot2ger/> (abgerufen 01/2024)
- E-Bridge Consulting GmbH. (*Hydex & HydexPLUS – Kostenindizes für Wasserstoff*;
<https://e-bridge.de/kompetenzen/wasserstoff/h2index/> (abgerufen am 28.11.2023)
- EMCEL. *Wasserstoffdruckbehälter: Welche Druckbehälter-Typen gibt es?*
<https://emcel.com/de/wasserstoffdruckbehaelter/> (abgerufen am 31.03.2023)
- EnBW. *Wasserstoff im Erdgasnetz – geht das?*
<https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-im-erdgasnetz.html>
(abgerufen am 25.04.2024)
- EUROGATE. *Preis-und Konditionsverzeichnis*;
<https://www1.eurogate.de/content/download/10008/109983/version/4/file/EU-ROGATE+Preis-und+Konditionsverzeichnis+2023.pdf> (01.01.2023)
- EUROGATE, M. Kuschowsky. *Für unsere Nachbarn: Informationen zu ihrer Sicherheit*;
https://www1.eurogate.de/wp-content/uploads/2023/12/info_nach_storfallverordnung.pdf (04/2022)
- European Energy Exchange AG. *EEX Wasserstoff-Index*;
<https://www.eex-transparency.com/de/wasserstoff> (abgerufen am 28.11.2023)
- European Hydrogen Backbone (EHB). *The European Hydrogen Backbone (EHB) initiative*;
<https://ehb.eu/> (abgerufen am 28.02.2024)
- FANachRoh. *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.*
<https://biokraftstoffe.fnr.de/> (abgerufen 01/2024)
- FuelCellsWorks. *Galp Announces Launch of a Major 100 MW Electrolysis Plant in Portugal*;
<https://fuelcellsworks.com/news/galp-announces-launch-of-a-major-100-mw-electrolysis-plant-in-portugal/> (abgerufen am 19.04.2024)
- Gen2 Energy. *Gen2 Energy partner with Sirius Design & Integration to develop world's first carrier for hydrogen*;
<https://gen2energy.com/gen2-energy-partner-with-sirius-design-integration-to-develop-worlds-first-carrier-for-hydrogen/> (abgerufen am 29.04.2024)
- Göbelbecker, J. *Was kostet Wasserstoff jetzt und in Zukunft?*
<https://www.chemietechnik.de/energie-utilities/wasserstoff/was-kostet-wasserstoff-jetzt-und-in-zukunft-338.html> (abgerufen am 28.11.2023)
- H₂Marsch. *Wasserstoff für eine klimafreundliche Industrie in der Wesermarsch*
<https://www.wasserstoff-niedersachsen.de/h2marsch/> (abgerufen 04/2024)
- Habibic, A. *Uniper looking into Provaris' compressed hydrogen carriers for hydrogen import*;
<https://www.offshore-energy.biz/uniper-looking-into-provaris-compressed-hydrogen-carriers-for-hydrogen-import/> (abgerufen am 06.03.2024)

- IMO. *The International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code*;
<https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/DangerousGoods-default.aspx>
 (abgerufen am 17.07.2023)
- Initiative GET H₂. *FAQ zu Erzeugung & Import*;
<https://www.get-h2.de/erzeugung-import/> (abgerufen am 09.04.2024)
- ISO. *ISO 668:2020*;
<https://www.iso.org/standard/76912.html> (abgerufen am 25.04.2024)
- Karzick, L. -M. *Studie enthüllt: Grüner Wasserstoff noch teurer als befürchtet*;
<https://www.inside-digital.de/news/studie-enthueellt-gruener-wasserstoff-noch-teurer-als-befuerchtet> (abgerufen am 28.02.2024)
- Lerner, M. *Bundesanstalt für Straßenwesen; Fahrleistungserhebung*. Retrieved from
<https://www.bast.de/DE/Publikationen/DaFa/2018-2017/2017-04.html> (abgerufen 04/2024)
- Lohmann, H. *Delegierter Rechtsakt zur RED II als Booster für Wasserstoffprojekte*;
<https://www.energate-messenger.de/news/232648/delegierter-rechtsakt-zur-red-ii-als-booster-fuer-wasserstoffprojekte> (abgerufen am 28.02.2024)
- Lohse, A. *Was auch noch wichtig ist...*;
<https://power-to-x.de/was-auch-noch-wichtig-ist-ticker-kw-09/> (abgerufen am 05.03.2024)
- Mack, A. *Kosteneffiziente Wertschöpfungskette für Hochdruck-Wasserstofftransport von Produktionsstandorten zu Tankstellen*;
<https://idw-online.de/de/news829845> (abgerufen am 07.03.2024)
- MacroMicro. *Global container freight rate index from January 2019 to August 2023*;
<https://www.statista.com/statistics/1250636/global-container-freight-index/>
 (abgerufen am 27.11.2023)
- Meyer-Larsen, N. *Machbarkeit und Potenziale containerisierter Wasserstofftransporte*;
 Kieserling-Stiftung, 2023
- MT Container GmbH. *Container-Transport – Optionen im Überblick*;
<https://www.mtcontainer.de/container-service/transport/> (abgerufen am 27.11.2023)
- NTB. *Referenztarif*;
<https://www.ntb.eu/wp-content/uploads/ntb/NTB-Referenztarif-DE-01.04.2022.pdf> (01.04.2022)
- OTIF. *Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung*;
https://otif.org/fileadmin/new/3-Reference-Text/3B-RID/RID_2019_D_05_February_2020.pdf (01.01.2019)
- Pawlik, V. *Statista: Höhe der CO₂-Emissionen in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2023*;
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2275/umfrage/hoehe-der-co2-emissionen-in-deutschland-seit-1990/> (abgerufen 04/2024)

- Podbregar, N. *Wie teuer wird grüner Wasserstoff?*
<https://www.scinexx.de/news/energie/wie-teuer-wird-gruener-wasserstoff/>
 (abgerufen am 28.11.2023)
- Sagdur, Y. *European Hydrogen Backbone;*
<https://ehb.eu/files/downloads/EHB-2023-20-Nov-FINAL-design.pdf> (20.11.2023)
- Schaal, S. *H₂ Mobility stellt auf neues Preismodell um;*
<https://www.electrive.net/2023/10/04/h2-mobility-stellt-auf-neues-preismodell-um/> (abgerufen am 28.02.2024)
- Schiff&Hafen. *Konzept für Wasserstofftanker vorgestellt;*
<https://www.schiffundhafen.de/nachrichten/schiffbau/detail/konzept-fuer-wasserstofftanker-vorgestellt.html> (abgerufen am 19.04.2024)
- Scottish Government. *Hydrogen action plan;*
<https://www.gov.scot/publications/hydrogen-action-plan/pages/6/> (abgerufen am 19.04.2024)
- Statista. *Energiebedingte Kohlendioxid-Emissionen (CO₂) je Einwohner in Bremen von 1991 bis 2021;*
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/255160/umfrage/kohlendioxid-emissionen-je-einwohner-in-deutschland-nach-bundeslaendern/> (abgerufen 04/2024)
- UWS Umweltmanagement GmbH. *ADR/RID 2017 Teil 4 Vorschriften für die Verwendung von Verpackungen und Tanks;*
https://www.umwelt-online.de/regelwerk/cgi-bin/suchausgabe.cgi?pfad=/gefahr.gut/adr/adr_rid17/42.htm&such=allgemeine (abgerufen am 12.04.2024)
- Vanswijgenhoven, T. *Type 5 storage tanks for hydrogen.* (18.03.2024)
- Wellbrock, A. *private Kommunikation* (06.02.2024; Dr. Meyer-Larsen, Interviewer)
- Wietschel, P. D. *Wie könnten sich Nachfrage und Preise für Wasserstoff bis 2045 entwickeln?*
<https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2023/presseinfo-02-nachfrage-preise-wasserstoff-2045.html> (abgerufen am 28.11.2023)
- Zentralkommission für die Rheinschifffahrt. *Europäisches Übereinkommen vom 26. Mai 2000 über die internationale Beförderung von gefährlichen Gütern auf Binnenwasserstraßen (ADN);*
https://www.ccr-zkr.org/files/conventions/adn/ADN_2023de.pdf (01.01.2023)
- Zukunft Gas. *Wasserstoff in der Gas-Infrastruktur;*
<https://gas.info/gas-im-energiemix/gas-infrastruktur/wasserstoff-im-gas-netz>
 (abgerufen 04/2024)

Anhang

Anhang Rundreisen der Referenzhäfen

Tabelle 10: Rundreisen der Referenzhäfen

Referenzhafen	Rundreise
Grangemouth	Grangemouth – Rotterdam – Grangemouth
Bergen	Bergen – Måløy – Ålesund – Bremerhaven – Egersund – Stavanger – Fusa – Bergen
Reykjavik	Reykjavik – Rotterdam – Bremerhaven – Rotterdam – Reykjavik – Grundarfjörður – Reykjavik
Agadir	Agadir – Tanger – Rotterdam – Hamburg – Antwerpen – Le Havre – Tanger – Casablanca – Agadir
Algeciras (2 Linien)	Algeciras – Gqeberha (ehemals Port Elizabeth) – Durban – Kapstadt – Tanger – Rotterdam – Thames – Bremerhaven – Rotterdam – Algeciras Algeciras – Rotterdam – Thames – Bremerhaven – Jeddah – Salalah – Colombo – Ennore – Colombo – Salalah – Algeciras
New York (2 Linien)	New York – USPDP – USNFF – Klaipėda – Gdynia – Göteborg – Bremerhaven – New York New York – USNFF – Port of Baltimore – Port of Charleston – Port of Savannah – New York – Bremerhaven – Antwerpen – Le Havre – New York
Port Said	Port Said – Thames – Rotterdam – Bremerhaven – Ashdod – Alexandria – Port Said
Rio de Janeiro	Rio de Janeiro – Santos – Navegantes – Buenos Aires – Montevideo – Rio Grande – Paranaguá – Santos – Rio de Janeiro – Salvador – Pecém – Tanger – Rotterdam – Thames – Bremerhaven – Hamburg – Antwerpen – Le Havre – Sines – Rio de Janeiro
Kapstadt	Kapstadt – Tanger – Rotterdam – Thames – Bremerhaven – Rotterdam – Algeciras – Gqeberha (ehemals Port Elizabeth) – Durban – Kapstadt
Jebel Ali	Jebel Ali – Khalifa Port – Qasim – Nhava Sheva – Mundra – Jeddah – Tanger – Southampton – Rotterdam – Bremerhaven – Antwerpen – Le Havre – Algeciras – Jeddah – Jebel Ali



Institut für
Seeverkehrswirtschaft
und Logistik

