

Seehäfen in der Energiewende: Wasserstoff

ARBEITSPAPIER

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	2
Hintergrund	2
Wasserstoff: Ein kurzer Überblick	2
Aktuelle Politik	4
Häfen in einer zukünftigen grünen Wasserstoffwirtschaft	4
Wasserstoff als Umschlagsgut	5
Wasserstoff als Schiffstreibstoff: Tankinfrastruktur	8
Wasserstoff als Treibstoff: Anwendung auf Terminals	9
Produktion	10
Fazit.....	11
Wasserstoff als Umschlagsgut & Schiffskraftstoff.....	11
Anwendung auf Terminals	12
Produktion	12
Quellen- und Literaturverzeichnis	13

Einleitung

Die Abkehr von fossilen Brennstoffen hin zur Nutzung anderer Energieträger bedeutet wesentliche Veränderungen in den Seehäfen. Denn in den Häfen werden Energieträger umgeschlagen, Energie verwendet und Strom selbst produziert¹. Im Jahr 2020 beispielsweise haben deutsche Seehafenbetriebe 22,1 Mio. Tonnen Erdöl, 7,4 Mio. Tonnen Kohle und 55.022 Tonnen Erdgas umgeschlagen² – nachgefragt werden zukünftig verstärkt alternative Energieträger, wie z.B. verflüssigtes Erdgas (LNG) und Wasserstoff bzw. daraus hergestellte Derivate. Auf den Terminals läuft die Umrüstung auf umweltfreundlichere Antriebsarten bei Gerätschaften wie Greifstaplern, Portalhubwagen oder auch Pkw- und Lkw-Fahrzeugflotten. Alternative Brennstoffe, aber auch Elektrifizierung spielen hier eine große Rolle. Einige Unternehmen erzeugen mit Windenergie- oder Photovoltaikanlagen auf ihrem Betriebsgelände selbst klimafreundlichen Strom³.

In diesem Transformationsprozess gilt „grüner“ Wasserstoff als ein Energieträger, der besonders viel Potenzial hat, einen Beitrag zur Reduktion von klimaschädlichen Emissionen zu leisten. Zwar lässt sich die weitere Entwicklung des zukünftigen Einsatzes von Wasserstoff noch nicht genau vorhersagen, jedoch können Seehäfen in einer zukünftigen grünen Wasserstoffwirtschaft als Umschlag-, Nutzungs- und Produktionsstandorte von Wasserstoff eine wichtige Position einnehmen.

Dieses Arbeitspapier wird die Chancen und Herausforderungen für die deutschen Seehäfen in Bezug auf den Umschlag von Wasserstoff, seine Bereitstellung als Schiffstreibstoff, die Anwendung auf Terminals und die Produktion von Wasserstoff im Hafengebiet diskutieren. Aus der Betrachtung werden erste Schlussfolgerungen zu den verbundenen technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Anforderungen gezogen, die erfüllt werden müssen, damit die Häfen ihren Platz in einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft einnehmen können. Das Arbeitspapier wird weiter aktualisiert werden, um die Anforderungen der Seehäfen in die laufende Diskussion einzubringen.

Hintergrund

Wasserstoff: Ein kurzer Überblick

Vielorts wird „grüner“ Wasserstoff als *der* Energieträger der Zukunft gehandelt. Wenn mehr erneuerbare Energie zum Einsatz kommen soll, um dem Klimawandel entgegenzuwirken, braucht es ein Speichermedium, da beispielsweise Wind und Sonne nicht gleichmäßig verfügbar sind. Hier kann „grüner“ Wasserstoff als molekularer Energiespeicher, der durch Verbrennung wieder in Energie umgewandelt wird, verwendet werden⁴. Aber was genau ist mit „grünem“ Wasserstoff gemeint?

Wasserstoff, als chemisches Element, ist auf der Erde in nahezu unbegrenzten Mengen vorhanden, vornehmlich in chemischen Verbindungen wie Wasser oder Säuren. Das Element kann über verschiedene Verfahren aus diesen Verbindungen herausgelöst werden. In purer Form ist Wasserstoff ein farb- und geruchsloses, leichtes Gas, das wie Erdgas zusammengepresst unter hohem Druck oder in flüssiger Form gespeichert werden kann.

Wasserstoff an sich ist keine Energiequelle, sondern ein Energieträger, mit dessen Hilfe man Energie speichern und transportieren kann⁵. Die Energie wird bei der Gewinnung von Wasserstoff zugeführt:

¹ Vgl. ZDS-Positionspapier *Von Kohle zu Wasserstoff – Seehäfen in der Energiewende*.

² GENESIS-Online Datenbank, Seeverkehrsstatistik (46331-0001), Statistisches Bundesamt.

³ Vgl. ZDS-Positionspapier *Von Kohle zu Wasserstoff – Seehäfen in der Energiewende*.

⁴ https://www.iwes.fraunhofer.de/de/presse_medien/projekt--gruener-wasserstoff-fuer-bremerhaven--startet.html, zuletzt aufgerufen am 04.06.2021.

⁵ <http://www.iwr.de/wasserstoff/wasserstoff-infos.html>, zuletzt aufgerufen am 04.06.2021.

Bei der Wasserelektrolyse etwa, in der unter Einsatz von Strom Wasser in die Bestandteile Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) zerlegt wird, wird die elektrische in chemische Energie umgewandelt und im Wasserstoff gespeichert⁶.

Je nachdem, wie der Wasserstoff gewonnen wird, spricht man bspw. von „grünem“, „blauen“ oder „grauem“ Wasserstoff⁷. Vom Produktionsverfahren hängt auch die Umweltfreundlichkeit ab:

- „Grauer“ Wasserstoff entsteht durch Dampfreformierung von fossilen Energieträgern (meistens Erdgas). Bei der Herstellung wird in jedem Fall CO₂ freigesetzt, er ist also nicht CO₂-neutral⁸.
- „Blauer“ Wasserstoff ist „grauer“ Wasserstoff, bei dessen Herstellungsverfahren das entstehende CO₂ aufgefangen und gespeichert wird (Carbon-Capture-and-Storage (CCS)). Er gilt daher als CO₂-neutral⁹.
- „Türkiser“ Wasserstoff ist Wasserstoff, der über die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt wurde. Anstelle von CO₂ entsteht dabei fester Kohlenstoff. Unter bestimmten Voraussetzungen gilt die Herstellung des türkisenen Wasserstoffes als CO₂-neutral¹⁰.
- „Gelber“ (manchmal auch „violett“, „rot“ oder „rosa“) Wasserstoff wird durch Elektrolyse, jedoch unter Verwendung von Strom aus Atomkraftwerken gewonnen¹¹.
- Wird Wasserstoff durch Elektrolyse produziert und dabei elektrischer Strom aus erneuerbaren Quellen wie Wind oder Sonne verwendet, spricht man von „grünem“ Wasserstoff¹². Dieser ist CO₂-frei.

Dieses Verfahren gehört zu den sogenannten Power-to-X-Technologien (PtX), bei denen Strom, teilweise durch Zuführung weiterer Ausgangsstoffe, in verschiedene Energieformen oder -träger gewandelt wird, z.B. in Wärme (Power-to-Heat), Gase (Power-to-Gas), oder flüssige Energieträger (Power-to-Liquid)¹³. Durch die Zuführung von CO₂ nach der Wasserelektrolyse kann aus Wasserstoff beispielsweise Methan erzeugt werden¹⁴, während aus Stickstoff und Wasserstoff die Synthese von Ammoniak möglich ist¹⁵. Beide Technologien sind Power-to-Gas-Verfahren. Methanol kann ebenso ein Syntheseprodukt von Wasserstoff (Power-to-Liquid) sein¹⁶. Im zukünftigen Energiemix des Landes werden auch

⁶ <http://www.iwr.de/wasserstoff/wasserstoff-infos.html> , zuletzt aufgerufen am 04.06.2021.

⁷ <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html> , zuletzt aufgerufen am 31.05.2021.

⁸ <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html> , zuletzt aufgerufen am 31.05.2021.

⁹ <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html> , zuletzt aufgerufen am 31.05.2021.

¹⁰ <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html> , zuletzt aufgerufen am 31.05.2021.

¹¹ <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/die-vielen-farben-des-wasserstoffs-a-987307/> , zuletzt aufgerufen am 31.05.2021.

¹² <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html> , zuletzt aufgerufen am 31.05.2021.

¹³ <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html> , zuletzt aufgerufen am 31.05.2021.

¹⁴ <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/klima-und-energie-info/power-to-x> , zuletzt aufgerufen am 02.06.2021.

¹⁵ https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/607/9264_Power_to_X_Technologien.pdf , zuletzt aufgerufen am 02.06.2021.

¹⁶ https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/607/9264_Power_to_X_Technologien.pdf , zuletzt aufgerufen am 02.06.2021.

gasförmige und flüssige synthetische Energieträger, bei denen grüner Wasserstoff als Grundstoff dient, voraussichtlich eine große Rolle spielen.

In den aktuellen Diskussionen rund um Wasserstoff gilt vor allem der grüne Wasserstoff als Energieträger der Zukunft, da er durch seine klimafreundliche Herstellung das größte Potenzial für CO₂-Einsparungen mit sich bringt. Allerdings wird aufgrund der bestehenden Hindernisse, die den Einsatz von grünem Wasserstoff im großen Stil momentan noch verhindern (z.B. hohe Kosten, mangelnde Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien), damit gerechnet, dass in einer Übergangszeit auch blauer Wasserstoff einen Beitrag zur Verringerung der CO₂-Emissionen leisten wird, vor allem, wenn sich ein europäischer Markt für diesen CO₂-neutralen Wasserstoff gebildet hat. Ein solcher Markt könnte auch den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien beschleunigen (zum Beispiel in der Stahlindustrie)¹⁷.

Die potenziellen Anwendungsbereiche für grünen Wasserstoff liegen vor allem im Industrie- und im Verkehrssektor. In der Industrie, beispielsweise bei der Stahlherstellung und Metallverarbeitung, könnten bei vielen Prozessen zukünftig grüner Wasserstoff oder seine Folgeprodukte eingesetzt werden¹⁸. Im Verkehrssektor können Wasserstoff und seine Syntheseprodukte in Brennstoffzellen und in der konventionellen Technik (Verbrennungsmotor) eingesetzt werden. Vor allem in Bereichen, wo batteriebetriebene Antriebe technisch kaum umsetzbar sind, können synthetische Kraftstoffe auf Wasserstoffbasis die CO₂-Emissionen reduzieren¹⁹.

Aktuelle Politik

Aufgrund der Notwendigkeit, den Ausstoß von CO₂-Emissionen drastisch zu senken und des Potenzials von Wasserstoff als ein umweltfreundlicher Energieträger wurden im Jahr 2020 auf allen politischen Ebenen Pläne und Maßnahmen zur Förderung von Wasserstoff beschlossen. Auf EU-, auf Bundes- und auf Länderebene wurden Wasserstoffstrategien verabschiedet, deren Maßnahmen in der Vorbereitung bzw. in der Umsetzung sind. Übergeordnetes Ziel ist die Schaffung einer europäischen bzw. deutschen Wasserstoffwirtschaft. Hierfür sollen zügig die notwendigen Voraussetzungen, wie bspw. mehr Förderung für Forschung und Innovation, eine Wasserstoffinfrastruktur, eigene Produktionskapazitäten und der entsprechende regulatorische Rahmen geschaffen werden. Auf eine besondere Rolle für die Seehäfen in einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft weisen vor allem die norddeutschen Bundesländer hin, da in den Seehäfen bereits gute Voraussetzungen für den Import von grünem Wasserstoff und anderen synthetischen Energieträgern bestünden.

Häfen in einer zukünftigen grünen Wasserstoffwirtschaft

Sowohl in der deutschen als auch in der europäischen Wasserstoffstrategie wird darauf hingewiesen, dass große Mengen grünen Wasserstoffs oder seiner Derivate außerhalb von Deutschland bzw. Europa erzeugt werden müssen, da der zu erwartende Bedarf nicht durch Produktion hierzulande abgedeckt werden kann. Wasserstoff und die Syntheseprodukte müssten also mit Hilfe von erneuerbaren Energien in Partnerländern mit günstigen klimatischen Bedingungen produziert und von dort nach Deutschland und Europa importiert werden²⁰. Seehafenbetrieben bietet eine Wasserstoffwirtschaft also Gelegenheiten, neue Geschäftsfelder zu erschließen. Die folgenden Abschnitte betrachten die Bereiche Umschlag, Wasserstoff als Schiffstreibstoff, Anwendung auf Terminals und die Produktion von Wasserstoff im Hafengebiet.

¹⁷ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html> , zuletzt aufgerufen am 31.05.2021.

¹⁸ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html> , zuletzt aufgerufen am 31.05.2021.

¹⁹ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html> , zuletzt aufgerufen am 31.05.2021.

²⁰ https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/policy_brief_wasserstoff.pdf , zuletzt aufgerufen am 04.06.2021.

Wasserstoff als Umschlagsgut

Wasserstoff kann als Gas, unter Druck oder flüssig (tiefkalt) gelagert und transportiert werden²¹. Die höchste Speicherdichte bezogen auf das reine Speichervolumen hat Wasserstoff, wenn er verflüssigt ist. Flüssig wird Wasserstoff bei -253 Grad Celsius. Die Gewährleistung eines ausreichenden Drucks bzw. des flüssigen Zustandes erfordern einen erheblichen technischen und energetischen Aufwand. Die Lagerung von tiefkaltem, flüssigen Wasserstoff stellt zudem höchste Anforderungen an das Material des Lagerbehälters.

Neben dem Transport in gasförmiger oder flüssiger Form könnte Wasserstoff zukünftig auch in flüssigen organischen Trägermaterialien (Liquid Organic Hydrogen Carrier oder kurz LOHC) transportiert werden. Von ihrer Handhabung und den physikalischen Eigenschaften her sei die ölige Substanz üblichen Kraftstoffen recht ähnlich und ließe sich einfach und gefahrlos transportieren²², unter Nutzung der bestehenden Infrastruktur der Mineralölwirtschaft²³. Diese Variante würde also keine besonderen neuen Anforderungen an den Hafenumschlag stellen. Allerdings: Viel Energie ist erforderlich, um den gespeicherten Wasserstoff aus Trägermaterialien wieder herauszulösen²⁴. Entsprechende Anlagen für die Einspeicherung und Ausspeicherung könnten an Hafenstandorten entstehen; zuvor zu klären wäre jedoch die wirtschaftliche und ökologische Nutzen-Kosten-Bilanz dieser Transportvariante. Auch der Transport als Ammoniak oder Methanol, also als „Folgeprodukte“, die ebenfalls als Treibstoff dienen können, ist möglich. Hier gäbe es bereits etablierte Transport- und Umschlagstechnologie.

Grundsätzlich kann also Wasserstoff sowohl als konventionelles oder containerisierbares Stückgut oder auch als Massengut, nämlich als flüssiges oder gasförmiges Gas oder in Trägermaterialien, transportiert werden.

Zu beachten sind beim Transport als Gas in jedem Fall die Gefahrguteigenschaften von Wasserstoff. Nach der aktuell gültigen internationalen GHS-Kennzeichnung gilt Wasserstoff als „extrem entzündlich“. Die Behälter könnten bei übermäßiger Erwärmung explodieren. Daher ist Wasserstoff von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen und anderen Zündquellen fernzuhalten. Wasserstoff ist zudem an einem gut belüfteten Ort aufzubewahren. Beim Transport von Wasserstoff muss die an Transportgefäßen und Fahrzeugen anzubringende Warntafel die Gefahrennummer 23 (entzündliches Gas) und die UN-Nummer 1049 enthalten²⁵.

In der Schifffahrt regelt der International Maritime Code for Dangerous Goods (IMDG) der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation, als Ergänzung zum Internationalen Übereinkommen von 1974 zum Schutz des menschlichen Lebens auf See (SOLAS), den Transport von Gefahrgütern wie Wasserstoff. Er umfasst ausführliche Sondervorschriften und Verpackungsanweisungen. Aus der Behandlung als Gefahrgut ergeben sich also Anforderungen an den Transport, die eine Einbeziehung in den normalen Güterverkehr erschweren und verteuern, aber nicht ausschließen.

²¹ Darüber hinaus können auch Metalllegierungen und andere Materialien für die Speicherung von Wasserstoff verwendet werden. <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff/speicherung-von-wasserstoff> , zuletzt abgerufen am 02.06.2021.

²² https://www.fz-juelich.de/portal/DE/Forschung/EnergieUmwelt/wasserstoff/tb_h2_speicher.html , zuletzt aufgerufen am 04.06.2021.

²³ <https://futurefuels.blog/in-der-praxis/wasserstoff-speichern-mit-lohc/> , zuletzt aufgerufen am 04.05.2021.

²⁴ https://www.deutschlandfunk.de/tolle-idee-was-wurde-daraus-spezialoel-speichert-wasserstoff.676.de.html?dram:article_id=488895 , zuletzt aufgerufen am 04.06.2021.

²⁵ Siehe auch <https://www.gefahrgutbrumme.de/ADR/UN1049.html> , zuletzt aufgerufen am 04.06.2021.

Wasserstoff als konventionelles oder containerisierbares Stückgut

Der Transport von Wasserstoff als Gas mittels LKW ist weit verbreitet²⁶ und kann ebenso über die Schiene durchgeführt werden. Der Transport erfolgt in Tankwagen, in Gasflaschen oder in vergleichsweise kleinen schweren Stahlbehältern, die einzeln, in Bündeln oder auch in Bündeln mit den Außenabmessungen von Standardcontainern zusammengefasst werden können. Solche Behälter können ebenfalls per Schiff transportiert werden und gelten in der maritimen Logistik als konventionelles Stückgut bzw. containerisierbares Stückgut. Sie stellen grundsätzlich keine neuen Anforderungen an Gerätschaften oder Abläufe der Seehafenbetriebe oder an Regulierungsbehörden. Aus größeren Mengenzuwächsen jedoch ergäben sich neue Anforderungen an die Verfügbarkeit von geeigneten Standflächen auf den Umschlaganlagen²⁷.

Wasserstoff als Massengut

Um einen verstärkten Einsatz von Wasserstoff in weiten Teilen der Wirtschaft zu ermöglichen, wären deutlich größere Mengen des Energieträgers von seinen Produktionsstätten zu industrialisierten Wirtschaftsräumen zu transportieren und umzuschlagen. Für den Transport bieten sich zwei Möglichkeiten: Seeverkehr oder Rohrleitungen.

Für den maritimen Transport sind vor allem die Varianten flüssiger Wasserstoff bzw. flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC) sowie die Syntheseprodukte relevant. Für den Transport von flüssigem Wasserstoff fehlt es jedoch noch an geeigneten Schiffen. Das weltweit erste Transportschiff wurde im Frühjahr 2020 vorgestellt²⁸. Es soll verflüssigten Wasserstoff von Australien nach Japan bringen und kann zwei 1.250 m³ große Tanks transportieren, die bei hohem technischen Aufwand und Energieeinsatz Druck und Temperatur des Wasserstoffs sicherstellen. Vielen Verfahren ähneln jenen für LNG, sind jedoch deutlich anspruchsvoller. Das Schiff gilt als Pilotprojekt, das vor allem die technische Machbarkeit beleuchten soll.

Erst wenn die möglichen Dimensionen solcher Schiffe sowie deren konkreten Anforderungen als landseitige Umschlagstellen (mögliche Mengen, Sicherheitsanforderungen, Ladungsübergabeschnittstellen, etc.) klarer werden, können auch Umschlaganlagen konkreter konzipiert werden. Daher wird es für die Hafenvirtschaft erforderlich sein, die technischen Entwicklungen eng zu begleiten.

Der Transport des Wasserstoff-Syntheseproduktes Ammoniak hingegen ist weniger aufwendig, da es zum verflüssigten Transport deutlich weniger stark gekühlt werden muss. Außerdem benötigt Ammoniak bei gleichem Energiegehalt im Vergleich zu Wasserstoff weniger Raum, da die Energiedichte bezogen auf das Volumen höher ist. Ammoniak kann zudem in dünnwandigen, großen Metallcontainern gelagert werden²⁹. Für den Transport von Ammoniak gibt es bereits Tanker.

Die weitere Nutzung von Schiffen für den Transport von Wasserstoff als Massengut erfordert zudem noch einiges an Vorarbeit der Regulierungsbehörden. Die Konstruktion und Herstellung von Schiffen zum Transport von Flüssiggasen muss zwar dem Internationalen Code of the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (gemeinsam IGC Code) entsprechen, der von der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation (IMO) verabschiedet wurde. Doch während der derzeitige

²⁶ https://www.fwvw.de/fileadmin/Downloads/Einsatz_Wasserstoffleitfaden.pdf , zuletzt aufgerufen am 04.06.2021.

²⁷ Zum Beispiel dürften sich solche Container nicht in Stapeln befinden und dürften nur an Reihendenen, mit zugänglichen Türen stehen, um maximale Belüftung und Zugänglichkeit zu gewährleisten.

²⁸ <https://global.kawasaki.com/en/corp/rd/magazine/182/pdf/n182en07.pdf> , zuletzt aufgerufen am 04.06.2021.

²⁹ <https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/gruenes-ammoniak-dieser-oekologische-energietraeger-schlaegt-sogar-wasserstoff-a-5012251f-35e9-4430-b122-ddaa3d4758f1> , zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

IGC-Code Gase bzw. Flüssiggase wie LPG und LNG berücksichtigt, gilt er nicht für Flüssigwasserstoff. Aus diesem Grund hat die IMO vorläufige Empfehlungen für den Seeverkehr Japan-Australien mit Flüssigwasserstoff durch die Genehmigung eines gemeinsamen Vorschlags Japan-Australien vorgelegt³⁰, die in Deutschland in 2017 amtlich bekannt gemacht wurden³¹. Darüber hinaus haben Klassifikationsgesellschaften wie Class NK³² ergänzende Richtlinien entwickelt³³.

Eine weitere Transportmöglichkeit stellen Rohrleitungen dar. Bestehenden Erdgasnetze, wie das in Deutschland, können bereits heute (allerdings mit Einschränkungen) für den Transport von Wasserstoff genutzt werden³⁴. Bei der Einspeisung von Wasserstoff darf die Wasserstoffkonzentration im Erdgasnetz von derzeit fünf Prozent (bei einigen Anwendungen zwei Prozent) nicht überschritten werden³⁵. Um den prozentualen Anteil erhöhen zu können, müssten Materialien, Komponenten, Betriebsweise und Nutzeranforderungen genau untersucht und optimiert werden³⁶. Für eine solche Aufrüstung des bestehenden Erdgasnetzes wären also Investitionen erforderlich. Darüber hinaus wären Verknüpfungen mit den Weltregionen erforderlich, deren Lage gute Voraussetzungen für die Wasserstoffproduktion bieten. Diese könnten mit weiteren Rohrleitungen, aber auch mit Schiffen, geschaffen werden. In Seehäfen müssten Übergabestellen für Wasserstoffimporte in das Erdgasnetz entstehen, bzw. beim Aufbau eines gesonderten Wasserstoff-Gasnetzes müsste der Bedarf für die Anbindung von Häfen beachtet werden.

Dies bedeutet für die Häfen vor allem die Umrüstung bzw. Neuanschaffung von Gerätschaften für den Umschlag sowie Auf- und Umrüstung bei der Infrastruktur³⁷. Auch für den potenziellen Umschlag, die Lagerung und Bereitstellung als Treibstoff für Schiffe und den Weitertransport von Wasserstoff und seinen Syntheseprodukten werden Anpassungen notwendig sein.

Welche Transportform sich im Endeffekt durchsetzt, wird aber stark von der Kostenfrage abhängen, die wiederum von sehr vielen verschiedenen Faktoren abhängt, bspw. wie weit die Transportwege sind, in welcher Form der Wasserstoff transportiert wird, ob er am Ankunftsort direkt genutzt oder weiterverarbeitet und in welcher Form er genutzt wird.

Ein Arbeitspapier des Energiewirtschaftlichen Instituts (EWI) an der Universität zu Köln mit dem Titel „Estimating Long-Term Global Supply Costs for Low-Carbon Hydrogen“³⁸ zu den Kosten von Wasserstoffproduktion und den Transportwegen kommt beispielsweise zu dem Schluss, dass bei verhältnismäßig hohen Kosten für neue Wasserstoff-Pipelines der Transport per Schiff für Entfernungen über ca. 2.000 km kostengünstiger als Pipelines sei. Wenn jedoch Wasserstoff-Pipelines zu geringeren Kosten gebaut bzw. umgerüstet und betrieben werden könnten, seien Verflüssigung und Transport per Schiff

³⁰ Resolution MSC. 420 (97) Interim Recommendations for Carriage of Liquefied Hydrogen in Bulk, IMO (2016).

³¹ <https://www.gefahrgut.de/themen/seeverkehr--imdg-code/verfluessigter-wasserstoff-als-massengut>, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

³² Technische Überwachungsvereine der Schifffahrt.

³³ <https://global.kawasaki.com/en/corp/rd/magazine/182/pdf/n182en07.pdf>, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

³⁴ <https://www.dlr.de/content/de/artikel/dossier/wasserstoff/wasserstoff-transportieren-speichern-und-verteilen.html> zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

³⁵ https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9103_Fachbroschuere_Integration_erneuerbaren_Stroms_in_das_Erdgasnetz_Power_to_Gas.pdf, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

³⁶ <https://www.dlr.de/content/de/artikel/dossier/wasserstoff/wasserstoff-transportieren-speichern-und-verteilen.html>, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

³⁷ Vgl. ZDS-Positionspapier *Von Kohle zu Wasserstoff – Seehäfen in der Energiewende*.

³⁸ Hinweis: Die Studie betrachtet kohlenstoffarmen, also nicht nur „grünen“, Wasserstoff.

nur für Entfernungen von über 7.000 km kosteneffizienter. Allerdings variierten die Kosten für die Produktion und Transport von kohlenstoffarmem Wasserstoff von Land zu Land³⁹, und zudem würde auch eine Rolle spielen, ob der Wasserstoff am Ankunftsort noch umgewandelt werden muss oder im Transportzustand verwendet werden kann.

Laut dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ist davon auszugehen, dass der Aufbau von Produktionsanlagen und Transportinfrastrukturen einige Jahre dauern wird und mit „nennenswerten Importmengen“ ab 2030 zu rechnen ist⁴⁰. Daher müssen die Weichen in den Häfen jetzt gestellt werden. Die notwendigen Investitionen können allerdings von den Häfen nicht allein gestemmt werden. Daher sollten folgende Bereiche von der öffentlichen Hand verstärkt vorangetrieben werden:

- Forschung und Entwicklung von Transportmöglichkeiten von Wasserstoff
- Anpassung des Rechtsrahmens für den Umschlag, die Nutzung und den Transport von Wasserstoff
- Errichtung einer neuen bzw. Ertüchtigung der vorhandenen Infrastruktur in den Häfen, um den Umschlag von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten im großen Stil zu ermöglichen
- Klare, EU-weite Rahmenbedingungen für den Umschlag und die Lagerung von großen Mengen an Wasserstoff, Ammoniak, LOHC und Methanol.

Wasserstoff als Schiffstreibstoff: Tankinfrastruktur

Ein Treiber der Nachfrage für Wasserstoff und seiner Derivate könnte dessen Nutzung als Treibstoff von See- und Binnenschiffen sein. Die Europäische Union fördert beispielsweise ein Projekt mit dem Ziel, im Jahr 2024 mindestens zehn wasserstoffbetriebene Schiffe auf dem Rhein verkehren zu lassen⁴¹ und ein weiteres Projekt für eine Fähre in Norwegen soll neue technische Entwicklungen erproben⁴². Hierin wird großes Potenzial für die Dekarbonisierung der Schifffahrt gesehen⁴³. Allerdings sind zahlreiche Fragen noch zu beantworten, wie etwa die sichere Bunkerung an Bord von Frachtschiffen auf großer Fahrt sowie die Wirtschaftlichkeit als Treibstoff⁴⁴. Maersk, die weltweit größte Containerschiff-Reederei, sieht in Wasserstoff keinen Treibstoff für seine Flotte; Wasserstoff solle stattdessen genutzt werden, um Methanol und Ammoniak herzustellen⁴⁵. Wasserstoff als Treibstoff in der Schifffahrt befindet sich also noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase.

Rechtlichen Grundlagen für das Bunkern alternativer Schiffskraftstoffe in Häfen gibt es auf verschiedenen Ebenen: Es gibt Vorschriften einzelner Häfen, Regelungen auf Bundes- und Länderebene, Leitfäden und Standards, und globale oder regionale Instrumentarien (bspw. der EU oder IMO)⁴⁶. Auf Bundesebene gibt es in der bestehenden Gesetzgebung keine spezifischen Vorschriften für das Bunkern

³⁹ <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/estimating-long-term-global-supply-costs-for-low-carbon-hydrogen/>, S. 22-23, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

⁴⁰ https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/policy_brief_wasserstoff.pdf, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

⁴¹ <https://binnenschifffahrt-online.de/2020/07/schifffahrt/15756/eu-stellt-foerdermittel-fuer-wasserstoffbetriebene-binnenschiffe-bereit/>, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

⁴² <https://www.ship-technology.com/features/hydrogen-vessel/>, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

⁴³ <https://www.bbc.com/future/article/20201127-how-hydrogen-fuel-could-decarbonise-shipping>, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

⁴⁴ <https://www.man-es.com/marine/strategic-expertise/future-fuels/hydrogen>, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

⁴⁵ <https://shippingwatch.com/regulation/article12490208.ece>, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

⁴⁶ *Bunker Guidance für alternative Kraftstoffe in deutschen Seehäfen*, Deutsches Maritimes Zentrum, S. 21.

alternativer Schiffskraftstoffe von der Land- bzw. Seeseite. Stattdessen handelt es sich um Rahmenbedingungen zur Sicherstellung des Umwelt- und Arbeitsschutzes⁴⁷.

Für ortsfeste Anlagen zur Bebunkerung von Schiffen mit alternativen Kraftstoffen ist gegebenenfalls ein Genehmigungsverfahren nach Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) notwendig⁴⁸. Das Bundesimmissionsschutzgesetz überführt über die Störfallverordnung (12. Bundes-Immissionsschutzverordnung) die Seveso-III-Richtlinie (Richtlinie 2012/18/EU) in deutsches Recht. Die Richtlinie schreibt umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen im Umgang mit gefährlichen Stoffen vor und nimmt somit maßgeblichen Einfluss auf die Bedingungen für Bunkervorgänge alternativer Schiffskraftstoffe⁴⁹. Bei Bunkervorgängen unterliegen gefährliche Stoffe der Störfallverordnung, wenn diese im Anhang der Störfallverordnung als solche definiert sind. Dabei werden verflüssigte entzündbare Gase wie LNG, LPG, Ammoniak oder Wasserstoff (in ihrer verflüssigten Form) bei Mengen von 50 t bis 200 t in die untere Klasse und bei Mengen über 200 t in die obere Klasse gefährlicher Stoffe eingeordnet. Methanol, ein weiteres der Syntheseprodukte von Wasserstoff, fällt zwischen einer Menge von 500 t und 5.000 t in die untere Klasse und darüber in die obere Klasse gefährlicher Stoffe. Für den Störfallbetrieb erlässt die Störfallverordnung umfangreiche Sicherheitsvorkehrungen, die sich in Grundpflichten (gültig für untere und obere Klasse) und erweiterte Pflichten (ausschließlich obere Klasse) aufteilen⁵⁰.

Sollte sich Wasserstoff in Teilbereichen der Binnen- und Seeschifffahrt bewähren, so müssten Infrastrukturbetreiber wie Hafenbehörden – auch aus Standortwettbewerblichen Gründen – für eine Tankinfrastruktur sorgen, die Wasserstoff oder auch Wasserstoff-basierte Syntheseprodukte in ausreichenden Mengen an geeigneten Orten bereitstellt. Es gilt auch hier für die Hafenvirtschaft, die Entwicklungen bei Wasserstoff, aber auch bei etwaigen Alternativen, eng zu begleiten. Neben technischem Fachwissen werden auch finanzielle Investitionsmittel erforderlich sein. Daraus ergibt sich Handlungsbedarf für Infrastrukturbetreiber und die öffentliche Hand:

- Bereitstellung von Bunkervorrichtungen und Tankinfrastruktur zur Versorgung von Schiffen mit Wasserstoff oder Wasserstoff-basierten Syntheseprodukten als Treibstoff.

Wasserstoff als Treibstoff: Anwendung auf Terminals

In den nächsten Jahren werden die Seehafenbetriebe ihre Nutzfahrzeuge, Umschlag- und Arbeitsgeräte weiter erneuern, um umweltfreundlichere Varianten einzuführen. Da für den Umschlag und Transport beispielsweise von schwereren Gütern batteriebetriebene Fahrzeuge nur bedingt zum Einsatz kommen können, wird auch auf den Terminals die Nutzung von Wasserstoff untersucht, etwa von Gerätschaften mit Brennstoffzellenantrieb⁵¹.

Bei den Spezialgerätschaften, die im Hafen zum Einsatz kommen, sind u.a. folgende zu nennen, bei denen Wasserstoff potenziell eingesetzt werden kann bzw. bei denen schon Erprobungsphasen laufen:

- Portalhubwagen (Van/Straddle Carrier): Ein spezielles Umschlaggerät für Container, das als Transport- bzw. Flurförderfahrzeug auf Containerterminals eingesetzt wird.
- Greifstapler (Reachstacker): Flurförderfahrzeuge, die zum Stapeln und Umschlagen von Containern vom Boden oder von und zu Bahnwagen oder von und zu Wechselbrücken dienen. Es handelt sich um schwere Radfahrzeuge mit bis zu 50 Tonnen Hublast und bis rund 100 Tonnen Eigenmasse.

⁴⁷ *Bunker Guidance für alternative Kraftstoffe in deutschen Seehäfen*, Deutsches Maritimes Zentrum, S. 23.

⁴⁸ *Bunker Guidance für alternative Kraftstoffe in deutschen Seehäfen*, Deutsches Maritimes Zentrum, S. 27.

⁴⁹ *Bunker Guidance für alternative Kraftstoffe in deutschen Seehäfen*, Deutsches Maritimes Zentrum, S. 25.

⁵⁰ *Bunker Guidance für alternative Kraftstoffe in deutschen Seehäfen*, Deutsches Maritimes Zentrum, S. 25.

⁵¹ <http://www.iwr.de/wasserstoff/wasserstoff-infos.html>, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

- Zugmaschine für Ladungsaufleger (Tugmaster), die z.B. auf Fähr- oder Containerterminals eingesetzt wird.
- Gabelstapler mit hohen Traglasten (16 Tonnen)
- Transporter

Aktuell sind verfügbare Wasserstoff-angetriebene Modelle von Spezialfahrzeugen erheblich teurer als herkömmliche, da die Kosten für Brennstoffzellen sehr hoch sind und die Fahrzeuge noch nicht in Serienproduktion hergestellt werden. Durch Skaleneffekte sollten die Preise aber zukünftig sinken. Hin-zuzunehmen sind allerdings auch die Kosten für die benötigte Wasserstoffinfrastruktur. Da im Hafenumschlag eingesetzte Fahrzeuge und Geräte häufig keine Straßenzulassung haben, werden sie das im Aufbau befindliche öffentliche Wasserstofftankstellen-Netz nicht nutzen können. Jeder Hafenterminal wird also voraussichtlich eine eigene Tankstelle finanzieren müssen. Zusätzlich fallen auch noch deutlich höhere Betriebskosten an, da grüner Wasserstoff auf Sicht im Vergleich zu Diesel aufgrund der höheren Produktions- und Logistikkosten teurer ist. Die ökonomische und ökologische Wirtschaftlichkeit ist daher neben der technischen Machbarkeit und Zuverlässigkeit ein signifikanter Faktor bei der Entscheidung, wie alternative Antriebe auf Terminals eingesetzt werden. Eine weitere Voraussetzung ist, dass die technischen Vorschriften, etwa im Bereich des Brandschutzes und des Arbeitsschutzes, für den großflächigen Einsatz von Wasserstoff auf Terminals ausgelegt sind.

Auch bei der Umrüstung oder Neuanschaffung von Fahrzeugen und Gerätschaften, die mit Wasserstoff betrieben werden können, werden hohe Investitionen erforderlich sein, die die Seehafenbetriebe nicht allein bewältigen können. Es gibt bereits eine Reihe von Förderprogrammen für alternative Antriebe, die teilweise auch von Hafenunternehmen in Anspruch genommen werden, beispielsweise die Richtlinie zur Förderung der Erneuerung der Nutzfahrzeugflotte oder die Förderrichtlinie Elektromobilität. Allerdings gibt es gerade bei den Spezialgerätschaften und bei wasserstoffgetriebenen Fahrzeugen noch einige Herausforderungen für die Unternehmen, wenn sie in diesen Bereichen Investitionen tätigen wollen. Neben Verfügbarkeit und Machbarkeit sind dies vor allem die Kosten. Hier müssen die wirtschaftlichen Anreize zur Anschaffung bzw. Umrüstung verstärkt werden. Um die Hafenbetriebe hier zu unterstützen, sollte die Politik:

- Forschung und Entwicklung beim Einsatz von Wasserstoff bei schwerem Gerät und Spezialanwendungen fördern
- Einen regulatorischen Rahmen für den Einsatz von Wasserstoff im Hafenbetrieb entwickeln
- Bei der Entwicklung von Förderprogrammen für Neuanschaffungen oder Umrüstungen von Nutzfahrzeugen auch die Spezialgerätschaften berücksichtigen, die im Hafen zum Einsatz kommen
- Förderzeiträume länger anlegen, da Hafengerätschaften in der Regel eine lange Nutzungsdauer (ca. 15 Jahre) haben, weswegen kurze Förderzeiträume hier hinderlich sind
- Förderquoten für die Zuschüsse bei Neuanschaffungen erhöhen, da diese angesichts der großen Summen, die investiert werden müssen, nicht ausreichend sind
- Mehr Augenmerk auch auf die finanzielle Unterstützung von notwendiger Infrastruktur, wie z.B. Tankstellen an Terminals, legen, da Hafengerätschaften nicht die öffentliche Tankstelleninfrastruktur nutzen können.

Produktion

In Seehäfen sind bereits viele Grundvoraussetzungen für die Produktion von grünem Wasserstoff vorhanden. Grüner Strom aus Offshore-Windanlagen wird dort angelandet – oder sogar vor Ort selbst

produziert. Dieser könnte im Elektrolyseverfahren zur Erzeugung von Wasserstoff genutzt werden. Zudem ist der Zugang zu Wasser gegeben, ebenso wie die Nähe zu Industriegebieten, in denen sich potenzielle Abnehmer für Wasserstoff oder dessen Derivate befinden. Allerdings gibt es auch viele Herausforderungen, wie z.B., dass Flächen zur Verfügung stehen und eine ausreichende Menge an grünem Strom vorhanden sein muss. Aktuell gibt es bereits mehrere Projekte in den norddeutschen Bundesländern, die eine Produktion von grünem Wasserstoff in Hafennähe vorsehen⁵². Zu den Hafestandorten gehören unter anderem der Bremer Industriehafen⁵³, Hamburg⁵⁴, Bremerhaven⁵⁵, Rostock und Brake. Damit auch in diesem Bereich die Möglichkeiten für Wasserstoff in Häfen geprüft werden können, sollten:

- Vorausschauend für zusätzliche Flächen für die Erschließung neuer Geschäftsfelder bei paralleler Entwicklung bestehender Geschäftsfelder gesorgt werden
- Die bestehende politische Unterstützung für solche Projekte oder „Testfelder“ fortgeführt und erweitert werden.

Fazit

Zwar lässt sich noch nicht ganz genau vorhersagen, wann, wie, in welchen Bereichen und in welchem Umfang grüner Wasserstoff seinen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen leisten wird und wann mit der tatsächlichen Etablierung einer grünen Wasserstoffwirtschaft in Deutschland und Europa zu rechnen ist. Es steht aber fest, dass die Häfen eine tragende Rolle spielen können, sofern sie bei den großen, notwendigen Investitionen unterstützt werden und die Politik die ihr zur Verfügung stehenden Hebel richtig einsetzt, um den Rahmen für einen Hochlauf von Wasserstofftechnologien zu schaffen und die Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft voranzutreiben. Durch die richtigen Impulse sowie Skaleneffekte sollte dann grüner Wasserstoff gegenüber fossilen Energieträgern auch wettbewerbsfähig werden.

Zusätzlich zu den richtigen Rahmenbedingungen gilt es, in den Bereichen Umschlag und Wasserstoff als Schiffstreibstoff, Anwendung auf Terminals und Produktion im Hafengebiet folgendes umzusetzen:

Wasserstoff als Umschlagsgut & Schiffskraftstoff

Folgende Bereiche sollten von der öffentlichen Hand verstärkt vorangetrieben werden:

- Forschung und Entwicklung von Transportmöglichkeiten von Wasserstoff
- Anpassung des Rechtrahmens für den Umschlag, die Nutzung und den Transport von Wasserstoff
- Errichtung einer neuen bzw. Ertüchtigung der vorhandenen Infrastruktur, um den Umschlag von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten im großen Stil zu ermöglichen
- Klare, EU-weite Rahmenbedingungen für den Umschlag und die Lagerung von großen Mengen an Wasserstoff, Ammoniak, LOHC und Methanol

⁵² <https://www.ihk-nord.de/blueprint/servlet/resource/blob/4946414/1b031da2d16e309d3afbb995c41e69f3/wasserstoff-projekte-im-norden-stand-11-2020-data.pdf>, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

⁵³ <https://www.bremen-innovativ.de/2020/01/das-projekt-h2b-im-bremer-industriehafen/>, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

⁵⁴ <https://www.hamburg.de/pressearchiv-fhh/14847126/2021-01-21-bukea-wasserstoffprojekt-am-standort-moorburg/>, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

⁵⁵ https://www.iwes.fraunhofer.de/de/presse_medien/projekt--gruener-wasserstoff-fuer-bremerhaven--startet.html, zuletzt aufgerufen am 07.06.2021.

- Bereitstellung von Bunkervorrichtungen und Tankinfrastruktur zur Versorgung von Schiffen mit Wasserstoff oder Wasserstoff-basierten Syntheseprodukten als Treibstoff

Anwendung auf Terminals

Um die Hafenerbetriebe zu unterstützen, sollte die Politik:

- Forschung und Entwicklung beim Einsatz von Wasserstoff bei schwerem Gerät und Spezialanwendungen fördern
- Einen regulatorischen Rahmen für den Einsatz von Wasserstoff im Hafenerbetrieb entwickeln
- Bei der Entwicklung von Förderprogrammen für Neuanschaffungen oder Umrüstungen von Nutzfahrzeugen auch die Spezialgerätschaften berücksichtigen, die im Hafen zum Einsatz kommen
- Förderzeiträume länger anlegen, da Hafengerätschaften in der Regel eine lange Nutzungsdauer (ca. 15 Jahre) haben, weswegen kurze Förderzeiträume hier hinderlich sind
- Förderquoten für die Zuschüsse bei Neuanschaffungen erhöhen, da diese angesichts der großen Summen, die investiert werden müssen, nicht ausreichend sind
- Mehr Augenmerk auch auf die finanzielle Unterstützung von notwendiger Infrastruktur, wie z.B. Tankstellen an Terminals, legen, da Hafengerätschaften nicht die öffentliche Tankstelleninfrastruktur nutzen können

Produktion

Auch im Bereich Produktion von Wasserstoff sollten die Möglichkeiten in Häfen ausführlich geprüft werden. Daher sollten:

- Vorausschauend für zusätzliche Flächen für die Erschließung neuer Geschäftsfelder bei paralleler Entwicklung bestehender Geschäftsfelder gesorgt werden
- Die bestehende politische Unterstützung für solche Projekte oder „Testfelder“ fortgeführt und erweitert werden

Quellen- und Literaturverzeichnis

Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren: Wasserstoff und dessen Gefahren, https://www.fwvbw.de/fileadmin/Downloads/Einsatz_Wasserstoffleitfaden.pdf.

BBC: The fuel that could transform shipping, <https://www.bbc.com/future/article/20201127-how-hydrogen-fuel-could-decarbonise-shipping>.

Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (Hamburg): Vier Partner unterzeichnen Absichtserklärung über 100 Megawatt Elektrolyse, <https://www.hamburg.de/pressearchiv-fhh/14847126/2021-01-21-bukea-wasserstoffprojekt-am-standort-moorburg/>.

Binnenschifffahrt: RH2INE: EU fördert wasserstoffbetriebene Binnenschiffe, <https://binnenschifffahrt-online.de/2020/07/schifffahrt/15756/eu-stellt-foerdermittel-fuer-wasserstoffbetriebene-binnenschiffe-bereit/>.

Brändle, Georg, Schönfisch, Max und Schulte, Simon: Estimating Long-Term Global Supply Costs for Low-Carbon Hydrogen (EWI Working Paper, No 20/04), <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/estimating-long-term-global-supply-costs-for-low-carbon-hydrogen/>.

Bundesministerium für Bildung und Forschung: Eine kleine Wasserstoff-Farbenlehre, <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html>.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Wasserstoff: Schlüsselement für die Energiewende, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: IPCEI Wasserstoff: Gemeinsam einen Europäischen Wasserstoffmarkt schaffen, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/ipcei-wasserstoff.html>.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Die Nationale Wasserstoffstrategie, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20.

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: Grüner Wasserstoff und Power-to-X, <https://www.bmz.de/de/entwicklungspolitik/wasserstoff>.

Deutsche Energie-Agentur (dena): Integration erneuerbaren Stroms in das Erdgasnetz, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9103_Fachbroschuere_Integration_erneuerbaren_Stroms_in_das_Erdgasnetz_Power_to_Gas.pdf.

Deutsche Energie-Agentur (dena): Power to X: Technologien, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/607/9264_Power_to_X_Technologien.pdf.

Deutschlandfunk: Spezialöl speichert Wasserstoff, https://www.deutschlandfunk.de/tolle-idee-was-wurde-daraus-spezialoel-speichert-wasserstoff.676.de.html?dram:article_id=488895.

Deutsches Maritimes Zentrum: Bunker Guidance für alternative Kraftstoffe in deutschen Seehäfen.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Wasserstoff transportieren, speichern und verteilen, <https://www.dlr.de/content/de/artikel/dossier/wasserstoff/wasserstoff-transportieren-speichern-und-verteilen.html>.

Diermann, Ralph: Dieser ökologische Energieträger schlägt sogar Wasserstoff,

<https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/gruenes-ammoniak-dieser-oekologische-energetraeger-schlaegt-sogar-wasserstoff-a-5012251f-35e9-4430-b122-ddaa3d4758f1>

Die Senatorin für Wirtschaft, Arbeit und Europa (Bremen): Das Projekt H2B im Bremer Industriehafen, <https://www.bremen-innovativ.de/2020/01/das-projekt-h2b-im-bremer-industriehafen/>.

Europäische Kommission: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf.

Forschungszentrum Jülich: Speicherung und Transport: eine flüssige Pfandflasche für Wasserstoff, https://www.fz-juelich.de/portal/DE/Forschung/EnergieUmwelt/wasserstoff/tb_h2_speicher.html.

Fraunhofer ISI: Chancen und Herausforderungen beim Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten, https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/policy_brief_wasserstoff.pdf.

Fraunhofer IWES: Projekt „Grüner Wasserstoff für Bremerhaven“ startet, https://www.iwes.fraunhofer.de/de/presse_medien/projekt--gruener-wasserstoff-fuer-bremerhaven--startet.html.

Future Fuels: Wasserstoff speichern mit LOHC, <https://futurefuels.blog/in-der-praxis/wasserstoff-speichern-mit-lohc/>.

Gefahrgut Brumme: UN: 1049 Wasserstoff verdichtet, <https://www.gefahrgut-brumme.de/ADR/UN1049.html>.

Gefahrgut.de: Verflüssigter Wasserstoff als Massengut, <https://www.gefahrgut.de/themen/seeverkehr--imdg-code/verfluessigter-wasserstoff-als-massengut>.

GENESIS-Online Datenbank, Seeverkehrsstatistik (46331-0001), Statistisches Bundesamt.

Huck, Gary: Die vielen Farben des Wasserstoffs, <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/die-vielen-farben-des-wasserstoffs-a-987307/>.

IHK Nord: Wasserstoffprojekte im Norden Deutschlands, <https://www.ihk-nord.de/blueprint/servelet/resource/blob/4946414/1b031da2d16e309d3afb995c41e69f3/wasserstoff-projekte-im-norden-stand-11-2020-data.pdf>.

IMO: Interim Recommendations for Carriage of Liquefied Hydrogen in Bulk (Resolution MSC. 420 (97)).

Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR): Infos zu Wasserstoff, <http://www.iwr.de/wasserstoff/wasserstoff-infos.html>.

Kawasaki Technical Review: No. 182, <https://global.kawasaki.com/en/corp/rd/magazine/182/pdf/n182en07.pdf>.

MAN Energy Solutions: Hydrogen, <https://www.man-es.com/marine/strategic-expertise/future-fuels/hydrogen>.

Ship Technology: HySHIP: inside Europe's flagship hydrogen ship demonstrator project, <https://www.ship-technology.com/features/hydrogen-vessel/>.

Shipping Watch: Maersk writes off hydrogen as fuel for containerships in the short-term, <https://shippingwatch.com/regulation/article12490208.ece>.

THB: Der erste Wasserstofftanker, <https://www.thb.info/rubriken/detail/news/der-erste-wasserstofftanker.html>.

TÜV SÜD: Transport von Wasserstoff, <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff/transport-von-wasserstoff>.

TÜV Süd: Speicherung von Wasserstoff, <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff/speicherung-von-wasserstoff>.

TÜV Süd: Power-to-X (PtX / P2X), <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/klima-und-energie-info/power-to-x>.

Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer: Norddeutsche Wasserstoffstrategie, <https://www.hamburg.de/content-blob/13179812/f553df70f865564198412ee42fc8ee4b/data/wasserstoff-strategie.pdf>.

Zentralverband der deutschen Seehafenbetriebe e.V.: Von Kohle zu Wasserstoff –Seehäfen in der Energiewende, https://www.zds-seehaefen.de/wp-content/uploads/2020/11/2020-11-04_ZDS-Positionspapier-Seeh%C3%A4fen-Energiewende.pdf.

Der Zentralverband der deutschen Seehafenbetriebe e. V. (ZDS) ist der Bundesverband der rund 150 am Seegüterumschlag in den Häfen beteiligten Betriebe in Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein. Der ZDS vertritt die gemeinsamen wirtschafts-, gewerbe-, sozial- und tarifpolitischen Interessen der Unternehmen und schließt für seine tarifgebundenen Mitglieder Tarifverträge für die Hafentarbeiter. Präsident: Frank Dreeke, Vizepräsident: Jens Aurel Scharner, Präsidiumsmitglieder: Prof. Dr. Sebastian Jürgens, Jan Müller, Angela Titzrath. Der Sitz des Zentralverbandes ist Hamburg.

Weitere Informationen erhalten Sie unter www.zds-seehaefen.de