Wasserstoff-Infrastruktur und maritime Wirtschaft

Technische, institutionelle und regionale Grundlagen für die Mittelstandspolitik

www.ifh-goettingen.de

ifh Forschungsbericht 3

Sven-Sören Schwerz, Lukas Meub, Till Proeger

Volkswirtschaftliches Institut
für Mittelstand & Handwerk
an der Universität Göttingen

CC BY NC ND

2022

Veröffentlichung des
Volkswirtschaftlichen Instituts für Mittelstand und Handwerk
an der Universität Göttingen

Forschungsinstitut im Deutschen Handwerksinstitut e.V.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

Die Wirtschaftsministerien der Bundesländer

DHKT DEUTSCHER HANDWERKSKAMMERTAG

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über **http://dnb.dnb.de** abrufbar.

ISSN 2751-2215
DOI-URL: https://dx.doi.org/10.47952/gro-publ-113
Alle Rechte vorbehalten

ifh Göttingen | Heinrich-Düker-Weg 6 | 37073 Göttingen
Tel.: +49 551 39 174882
E-Mail: info@ifh.wiwi.uni-goettingen.de
Internet: www.ifh-goettingen.de

GÖTTINGEN | 2022

© Titelmotiv: Shutterstock.com

Wasserstoff-Infrastruktur und maritime Wirtschaft

Technische, institutionelle und regionale Grundlagen für die Mittelstandspolitik

Zusammenfassung: Das deutsche System von Energieerzeugung und -verbrauch ist im Umbruch, was mit erheblichen Konsequenzen und Unsicherheiten für die mittelständische Wirtschaft einhergeht. Als eine Zukunftsperspektive wird der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft angesehen, was jedoch mit erheblichen technischen und institutionellen Herausforderungen verbunden ist. Die Überlegungen und Pilotprojekte, die als Grundlagen einer Wasserstoffwirtschaft dienen sollen, stehen entsprechend noch am Anfang. Da die Kosten fossiler Ressourcen komparativ stark angestiegen sind, haben erneuerbare Energien im Vergleich zu früheren Prognosen das Potenzial, diese schneller zu substituieren. Deutlich wird jedoch bereits, dass der Aspekt des internationalen Handels über die Seewege für eine Versorgung mit Wasserstoff entscheidend sein wird. Grundlage für eine funktionierende Infrastruktur sind einheitliche Ver- und Beladesysteme von Wasserstoff(-derivaten), wofür allerdings bislang keine internationalen Standards bestehen.

Um die Mittelstandspolitik und -forschung für die künftigen Anwendungsfelder der Wasserstoffwirtschaft vorzubereiten, beschreibt diese Studie den technischen und institutionellen Hintergrund und fasst den aktuellen Stand der praktischen Bemühungen um die Etablierung von Wasserstoffprojekten mit einem Fokus auf die maritime Wirtschaft zusammen. Ferner wird die künftige Relevanz des globalen Wasserstoffhandels herausgestellt. Übergreifend werden so die zentralen Aspekte der Wasserstoffwirtschaft und die Herausforderungen für Mittelstandsforschung und -politik kompakt aufbereitet dargestellt.

Volkswirtschaftliches **Institut**
für **Mittelstand & Handwerk**
an der Universität Göttingen

Inhalt

1 **Einleitung** ... 1

2 **Technischer Hintergrund** ... 3
2.1 Wasserstoffherstellungsverfahren ... 3
2.2 Power-to-X ... 4

3 **Institutioneller Hintergrund** ... 7
3.1 Europäische Union ... 7
3.1.1 Green-Deal und Fit for 55 ... 8
3.1.2 Von einer europäischen zur nationalen Roadmap ... 9
3.2 Die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) ... 10

4 **Regionaler Hintergrund: Modellregionen und Konzepte** ... 12
4.1 Hamburg Moorburg, Hamburg Green Hydrogen Hub ... 12
4.2 BMBF Wasserstoffleitprojekt H2Mare, Helgoland ... 13
4.3 BMBF Wasserstoffleitprojekt TransHyDE, Rügen – Port Mukran ... 15
4.4 Cuxhaven, Wasserstoffpotenzial für den Cuxhavener Hafen ... 17
4.5 Norwegen, Erste Wasserstofffähre ... 18
4.6 Shetland-Inseln & Orkney, Clean Energy Islands ... 20
4.7 Schottland, Europäischer Wasserstoffexport ... 21

5 **Perspektive: Globaler Wasserstoffhandel** ... 23

6 **Fazit** ... 25

7 **Literatur** ... 27

8 **Anhang** ... 31

Abbildungen

Abb. 1: Emissionen der H_2-Derivate 4
Abb. 2: Prozesse der Elektrolyse 5
Abb. 3: Lage der 28 LNG-Terminals in Europa 9
Abb. 4: Karte der weltweiten Windressourcen 13
Abb. 5: Darstellung von Wasserverbrauchen 16
Abb. 6: „Surf'n Turf"-Projekt in Orkney 20
Abb. 7: Planung eines H_2-Netzes in Europa 22
Abb. 8: Künftige Produktionskosten von Wasserstoff 24

Tabellen

Tabelle 1: Übersicht über ausgewählte H_2-Fahrzeugtypen in Deutschland (Stand 29.05.2022) 11
Tabelle 2: Exemplarische Rechnung anhand eines H-TEC Elektrolyseurs. 16

Tabellen im Anhang

Tabelle A 1: Auswahl aktueller Wasserstoff-Schiffe und Projekte im Jahr 2022 31
Tabelle A 2: H_2-Derivate zum Ersatz fossiler Brennstoffe 32

Abkürzungsverzeichnis

AEL	Alkalische Elektrolyse
AEM	Anionen-Austauschmembran
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, seit 12/2013 umbenannt in Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (bis 2021, danach BMWK)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (ab 2021, davor BMWi)
BRZ	Bruttoraumzahl
CAPEX	Capital Expenditures
CCS	Carbon Capturing and Storage
CfD	Contract for Differences (Differenzverträge)
CH_3OH	Methanol
CIMAC	Conseil International des Machines à Combustion, ist ein eingetragener Verein, der als Dachverband die weltweiten Interessender Großmotoren-Branche vertritt
CO_2	Kohlenstoffdioxid
COP21	Conference of Parties 2021
COP26	Glasgow Climate Change Conference
CTV	Crew Transfer Vessel
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMZ	Deutsche Maritime Zentrum
DNV-GL	Det Norske Veritas Germanischer Llyod Klassifizierungsgesellschaft
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
DWV	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
eFuel	electrical Fuel
EKF	Energie- und Klimafonds
EMEC	European Marine Energy Centre
EU	Europäische Union
EU-ETS	EU-Emissionshandelssystem
ESI	Environmental Ship Index
EWE	Elbe-Weser-Ems Energieversorger
F&E	Forschung und Entwicklung
FCH	Fuel Cell Hydrogen
FfE	Forschungsstelle für Energiewirtschaft
ft	Fuß
GIZ	Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit
GW	Gigawatt
H_2	Wasserstoff
H_2.N.O.N	Wasserstoffnetzwerk Nordostniedersachsen
H_2O	Wasser
HAZID	Hazard Identification, Gefahrenerkennung
HGHH	Hamburg Green Hydrogen Hub

HHLA	Hamburger Hafen und Logistik Agentur
HH-WIN	Wasserstoff-Starternetz
IEA	International Energy Agency
IHK	Industrie- und Handelskammer
IMO	Internationale Seeschifffahrts-Organisation
INTOG	Innovation and Targeted Oil and Gas
IPCEI	Important Project of Common European Interest
IRENA	International Renewable Energy Agency
ITZ	Innovations- und Technologiezentrum für Luft- und Schifffahrt
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
KKW	Kohlekraftwerk
kV	Kilovolt
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LH_2	Flüssigwasserstoff
LNG	Liquified Natural Gas (Flüssigerdgas)
LNH_3	Flüssigammoniak
LOHC	Liquid organic hydrogen carriers; flüssige organische Wasserstoffträger
MARPOL	Internationales Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe
MG	Marine Gas (Schiffsdiesel)
MHI	Mitsubishi Heavy Industries
MJ	Megajoule
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung
Mt	Megatonne (1 Mio. Tonnen)
MW	Megawatt (1 Mio. Watt)
MWh	Megawattstunde
NG	Natural Gas (Erdgas)
NH_3	Ammoniak
NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Nm^3	Normkubikmeter
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
O&M	Operation and Maintaince
O_2	Sauerstoff
OFTO	Offshore Transmission Station
OPEX	Operating Expenditures
P2X	Power-to-X
PEM	Protonenaustauschmembran
PEMEL	Protonenaustauschmembran
PGM	Platingruppenmetallen
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
PtX-Produkte	Power-to-X (L=Liquid, S=Steel, F=Fuel)

PV	Photovoltaik
SEA	Strategic environmental assessment
SO	Festoxidmembran
SOEC	Festoxidmembran
SOV	Service Operation Vessel
TEN-T	Trans-European Transport Net
THG	Treibhausgase
TrinkwV	Trinkwasser Verordnung
TRL	Technological Readiness-Level
TUHH	Technische Universität Hamburg-Harburg
TWh	Terrawattstunden
UNCED	Konferenzen der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung
VSM	Verband für Schiffbau und Meerestechnik e.V.
VTG	Größter europäischer Eisenbahngüterwagen-Vermieter und Schienenlogistiker
ZKR	Zentralkommission für die Rheinschifffahrt
ZEMS	Zero Emission Ship

1. Einleitung

Der Weltklimagipfel mit dem daraus resultierenden Kyoto-Protokoll sowie vorangegangene Konferenzen der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (UNCED) haben erste Zäsuren einer globalen Klimapolitik markiert. Seitdem haben politische Debatten an Fahrt aufgenommen, um regenerative, nachhaltige und langfristige Lösungen zur Minderung der Treibhausgase (THG) aus CO_2-Emissionen zu finden (Umweltbundesamt, 03.09.2021). Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) ist dabei das Bindeglied von globalen und supranationalen Entscheidungen (EU) gegenüber der deutschen Volkswirtschaft. Eine zentrale Frage ist, welche Art der Energieerzeugung und des Weitertransports künftig realisiert wird. Das BMWK bezeichnet dabei Wasserstoff (H_2) als „Schlüsselelement der Energiewende“ (BMWK, 2022).

Der bisherige nationale Wasserstoffmarkt besteht aus „Inseln“. Produktionsstandorte sind an lokale Abnehmer, meist Chemie- und Pharmaindustrie, gebunden und momentan nur begrenzt vorhanden. Nicht nur als Energielieferant, ebenso als Energieträger und -speicher kann Wasserstoff genutzt und in bestehende Transportinfrastrukturen eingebunden werden. Neben der potenziellen Integrierbarkeit in existierende Infrastrukturen erzielt Wasserstoff auch nach der Speicherung hohe Wirkungsgrade. Dies stellt einen weiteren Vorteil gegenüber Batterien dar (EWE, 17.12.2020). Eine pauschale Übertragbarkeit zu Gasinfrastrukturen, wie beim verflüssigten Erdgas (LNG), gibt es nicht (BMWi, 06.2020, S. 4 ff.). Die Energiespeicherung über Wasserstoff ermöglicht es prinzipiell, Überschüsse aus sonnenintensiven Solarstunden oder Windenergie aus Windüberschussphasen zu transformieren, speichern und transportieren. Grüner Wasserstoff aus erneuerbaren Energien hat dadurch das Potenzial, fossile Energieträger CO_2-neutral zu substituieren.

Preisdominierend ist dabei bislang die Wasserstoffproduktion aus nuklearer Energie. Da ein Kernkraftwerk dauerhaft und gleichbleibend viel Strom durch Kernspaltung produzieren kann, ist dieser Wasserstofferzeugungspreis günstiger (Wissenschaftlicher Dienst, Deutscher Bundestag, 03.04.2020; BMWi, 12.05.2021). Natürliche Umwelt- und Standortbedingungen alternativer Verfahren sind die Ursache für ungleiche Lastkurven und sorgen für höhere Produktionskosten. Sollten die Prognosen der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) der Bundesregierung bis 2030 eintreten und ein Wasserstoffbedarf von bis zu 110 Terrawattstunden (TWh) benötigt werden, läge zeitgleich die landesweite Menge aus Erzeugungsanlagen von Offshore- und Onshore-Energie bei 5 GW Gesamtleistung. Dies entspräche im besten Falle einer grünen H_2-Produktionsmenge von bis zu 14 TWh, was knapp einem Achtel der Bedarfsmenge zu diesem Zeitpunkt entspräche (BMWi, 06.2020, S. 2 f.).

Aufgrund der somit begrenzten national verfügbaren Produktionskapazitäten spielt der Wasserstofftransport eine entscheidende Rolle. Die Entfernung der Handelsstandorte ist dabei ein entscheidender Faktor für die Rentabilität des jeweiligen Transportmittels. Insbesondere die Schifffahrt steht vor Herausforderungen, da benötigte Schiffe zum Transport von Wasserstoff und mit eigenem Wasserstoffantrieb noch nicht existieren (Trittin, T., 2004, S. 318 ff.). Bisherige Studienmodelle und realisierte Projekte beschränken sich auf Fähren mit Wasserstoffantrieb und einer hybriden Lösung aus Brennstoffzellen sowie Batteriespeicherung, doch wachsen die Probleme mit der Reichweite, aber auch der Tank- und Transportkapazität. Gastanker haben im Gegensatz zu (Personen-) Fähren oder Offshore Crew Transfer Vessels (CTVs) keine planbaren und überschaubaren Distanzen sowie fixe Stationen zur Betankung (Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik, im Auftrag des DMZ, 09.11.2021, S. 31 f. und S. 141 ff.). Eine schrittweise Etablierung der Wasserstofftechnologie mittels standortbezogener Schiffstypen kann jedoch stetig größere Schiffsgrößen und Reichweiten ermöglichen.

Machbarkeitsstudien setzen zudem die Effizienz von Pipelines gegenüber Schiffen in den Vergleich (Der Nationale Wasserstoffrat, 16.07.2021, S. 2 ff.). Grundsätzlich würden die jeweiligen Einspeisungsorte weitläufig identisch bleiben und sich auf Küsten- oder Binnenhäfen beziehen (Krieg, D., 2012, S. 53 f.). Eine zentrale Frage der Versorgungskette ist jedoch, ab welchem Zeitpunkt in der Folgekette Wasserstoff hergestellt wird, ob dieser am Anfang oder Ende der Transportkette liegt und in welcher Form H_2 vorkommt. Es gibt wasserstoffbasierten Ammoniak, Methanol sowie weitere „electro fuels“[1], die aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften leichter zu transportieren sind. Dies erfordert einen weiteren Zwischenschritt in der Erzeugung. Mit Ammoniak geht beispielsweise eine erhöhte Toxizität einher und Stick-

[1] Anmerkung: eFuels sind Treibstoffe, die auf Grundlage von elektrischer Energie erzeugt wurden.

stoff, etwa aus Erdgas (NG), wird benötigt. Viele Faktoren beeinflussen die Debatte, welche Form (Derivat) des H_2 die Zukunft gestalten wird. Das norwegische Unternehmen HYON ist Partner in der Erstellung einer ersten wasserstofffähigen Fähre in Norwegen und prognostiziert eine Nischenlösung nach Schiffsgröße, Reichweite und Verbrauchsart. Einen ersten Beleg solcher Lösungen liefert die weltgrößte Reederei Maersk, die zwölf 350 m lange Containerschiffe in Auftrag gab, welche mit grünem Methanol aus H_2 betrieben werden (Maersk, Press Release, 18.08.2021). Private Energieerzeugungsunternehmen, Werften, Transportinfrastruktur-Dienstleister und die Industrie als Abnehmer haben in diesem komplexen Unterfangen die Schlüsselpositionen, da sie das Vorhaben der Bundesregierung praktisch umsetzen sollen. In Regionen mit Versorgungsengpässen aus erneuerbaren Energien sind andere Lösungen erforderlich. Pipelines oder Binnenschiffe könnten dabei Transportmittel sein. Neben der lokalen Wasserstofferzeugung werden infrastrukturelle Grundlagen in der Hafenlogistik etabliert. Eine Wasserstoffanlandung über die deutschen Häfen als Importprodukt aus Ländern mit großer Küstenfläche, einem Elektrizitätsüberschuss und geringem Eigenbedarf könnten hierbei zielführend sein. Übergreifend hätte die Etablierung solcher Strukturen viele Vorteile, da sich die deutsche Volkswirtschaft aus Abhängigkeiten der fossilen Brennstoffe lösen würde, Industrie und Mittelstand Aufträge erhielten und so die gesamtwirtschaftliche Wohlfahrt gesteigert werden könnte (Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik, im Auftrag des DMZ, 09.11.2021, S. 4 und S. 16 f.).

Während es bereits europäische Modellregionen und „Testlabore“ in Echtgröße gibt, wie etwa auf den Shetland-Inseln, in Orkney und in Schottland, benötigen größere Volkswirtschaften mit anteilig weniger Küstenfläche multiattributive Lösungsansätze. Eine Autarkie der deutschen Energiewirtschaft ist folglich unrealistisch, während ein internationaler Wasserstoffhandel aus erneuerbaren Energien ein Lösungsansatz wäre. Da Deutschland andere Standortvoraussetzungen hat als etwa Schottland, wird auch der Wasserstoffimport eine zentrale Rolle einnehmen. Chile, Marokko und Spanien sind ebenfalls an erstgenannter Stelle, wenn es um günstige Standortbedingungen für Wasserstoffexporte geht (LEE-NRW, 03.11.2020, S. 16 ff.). Gleichzeitig sind langfristige, zuverlässige und preisstabile Abkommen und Richtlinien im internationalen Wasserstoffhandel notwendig, damit die nationale Anlandung von Wasserstoff bei einer Umstellung des Energiesektors gesichert ist. Diese Festlegung entscheidet über die Rentabilität und das Fortbestehen der Elektrolyseanlagen, die im Wettbewerb zu Preisen aus fossiler und nuklearer Energie stehen. Dies bezieht sich auf den Bau neuer Offshore-, Onshore-, Photovoltaik- und Elektrolyseur-, bzw. Wasserstoffverflüssigungsanlagen, wie auch auf den Ausbau der Infrastruktur. Deutschland steht im internationalen Wettbewerb um H_2, da weitere Länder Nachfrageüberschüsse aufweisen (FCH Europa, 2019, S. 61 und S. 18 ff.).

Es zeichnet sich ab, dass viele Akteure und Ebenen zum Erfolg der Wasserstoffstrategie beitragen müssten und insbesondere die maritime Technik vor großen Herausforderungen steht. Diese Studie betrachtet das Zusammenspiel politischer Ziele, infrastruktureller sowie technischer Umsetzbarkeit und rahmenrechtlicher Bedingungen des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft mit besonderem Fokus auf die maritimen Aspekte. Diese umfassen dabei die Forschung, Fähigkeiten und Verfahren, die alle zugehörigen und bewirtschaftbaren Wasserflächen einbezieht, um zu einer effizienten, wirtschaftlichen Zielsetzung beizutragen. Hierfür werden aktuelle Studien im Auftrag privater und öffentlicher Akteure herangezogen und in den Vergleich bestehender Zielsetzungen und Absichtserklärungen gesetzt. Zudem werden technisch relevante Voraussetzungen, Verfahrensbeschreibungen und Machbarkeitsstudien angeführt. Im Vordergrund steht die erwähnte Rolle der maritimen Wirtschaft, die Forschungsgegenstand rascher Entwicklungen ist, ebenso wie das daraus resultierende Handlungspotenzial. Die so vorgestellten grundlegenden Strukturen und Zusammenhänge können der künftigen Mittelstandsforschung und -politik als eine Grundlage für die Weiterentwicklung des eigenen Zugangs und der Reflexion potenzieller Beiträge zur Wasserstoffwirtschaft dienen. Insbesondere die technischen und institutionellen Grundlagen, aber auch die Pilotprojekte geben dabei eine Vielzahl an Anknüpfungspunkten für mögliche Grundlagen einer Positionierung der mittelständischen Wirtschaft im Rahmen der Wasserstoffwirtschaft.

Zu diesem Zweck ist die vorliegende Studie wie folgt aufgebaut: Kapitel zwei stellt technische Grundlagen der Wasserstoffwirtschaft vor, während Kapitel drei die institutionellen Hintergründe, differenziert nach europäischen und nationalen rechtlichen Rahmenbedingungen, darstellt. Kapitel vier wiederum stellt einzelne Pilotprojekte der Wasserstoffwirtschaft vor; Kapitel fünf geht auf die Relevanz des globalen Wasserstoffhandels ein, und Kapitel sechs zieht ein Fazit der Studie.

2. Technischer Hintergrund

2.1 Wasserstoffherstellungsverfahren

Wasserstoff („H“) steht im Periodensystem an erster Stelle und ist das leichteste chemische Element. Unter atmosphärischen Bedingungen auf der Erde geht der Wasserstoff Verbindungen ein, sodass dieser molekular (zweiatomig) vorkommt und die Bezeichnung H_2 trägt. Dadurch, dass Wasserstoff nicht auf herkömmliche Art wie andere Ressourcen abgebaut werden kann und in der Natur nur selten in reiner Form vorkommt, gibt es verschiedene Methoden, um diesen aus seinen Verbindungen zu lösen. Die häufigste Verbindung tritt mit Sauerstoff als Wasser (H_2O) auf. Wasserstoff besitzt die Eigenschaften, geruchslos, geschmacksneutral und brennbar zu sein (Chemie.de, Lexikon, 2022). Sofern Wasserstoff austritt, ist dies für den Menschen per se ungefährlich. Erst wenn genügend Sauerstoff verdrängt wird, etwa in einem abgeschlossenen Raum, besteht Erstickungsgefahr. Molekularer Wasserstoff wurde bisher hauptsächlich in der Medizin und Chemie verwendet, indem er als Ausgangsstoff zur Herstellung von Salzsäure, Ammoniak, Methanol und vielen weiteren Stoffen diente. H_2 als Reduktionsmittel ist ein wichtiger Bestandteil der Metallurgie (Smolinka, T., Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2009, S. 1 ff.). Die vier bekanntesten Wasserstoffherstellungsverfahren sind die alkalische Elektrolyse (AEL), die Protonenaustauschmembran (PEM, auch PEMEL), die Festoxidmembran (SO) und die Anionen-Austauschmembran (AEM). Abgekürzt werden sie durch ihre englischen Namen. Während die SO und AEL überwiegend in der Erforschung sind, weisen die AEM und PEM eine ausgeprägtere Marktreife auf. Sie finden im industriellen Maßstab Anwendung.

Das PEM-Verfahren dominiert derzeit durch einen kompakten Aufbau der Stacks (Stapel), zuverlässige Produktion, eine hohe Reinheit des erzeugten Wasserstoffs und eine Einspeisung mit hoher Stromdichte (Dervisic, T., Engström, C., 2021, S. 99 ff.). Die Protonenaustausch-Elektrolyse erfolgt durch einen Abscheidungsprozess der Wasserbestandteile, indem eine Spannung angelegt wird und sich die Atome durch eine semipermeable Membran an Kathode und Anode setzen. Es verbleibt Sauerstoff (O_2) als Nebenprodukt (Mergel, J., Carmo, M., Fritz, D., 2013, S. 423 ff.). Sowohl PEM als auch AEM benötigen Reinstwasser oder Trinkwasser[2] nach den Vorgaben der TrinkwV 2020 | EU-Richtlinie 2020/2184-EU. Bisher weist das PEM-Verfahren Kostenvorteile gegenüber der AEM auf, dies könnte sich jedoch durch günstigere Komponenten verändern. Bisher gibt es nur einen Hersteller der AEM-Elektrolyseure, welcher einfachere Stahl-Bipolarplatten im Gegensatz zu Platingruppenmetallen (PGM), wie Titan, verwenden kann. Dies hängt damit zusammen, dass die Kammern der AEM-Stacks weniger saures Wasser haben und somit weniger stark korrodieren (Enapter, 20.10.2020). Die Kammer der alkalischen Elektrolyse (AEL) hingegen arbeitet im Vergleich zur PEM mit einer wässrigen anstatt einer sauren Membran-Elektrolyse. Die Vorteile der AEL sind zwar durch den geringeren Einsatz von Edelmetallen ebenfalls geringere Investitionskosten, allerdings war die AEL bisher jedoch auf eine Langzeitstabilität ausgelegt und keiner Volatilität der Stromerzeugung ausgesetzt. Unter Hinzunahme erneuerbarer Energien und der daraus schwankenden Lastkurven ändert sich dies jedoch. Eine solch grundsätzliche Veränderung der Ausrichtung ist ein Paradigmenwechsel für diese Elektrolyseur-Gattung (Fraunhofer-Gesellschaft, 2022). Ein weiteres Verfahren zur H_2-Gewinnung ist die Solid-Oxid (SO, auch SOEC)-Elektrolyse. Das SO-Verfahren zielt darauf ab, weniger Energie zu verbrauchen, da die Elektrolyse unter einer erhöhten Temperatur durchgeführt wird und die bereitgestellte Wärme in den Elektrolyseprozess einfließt. Dadurch sinkt der Strombedarf. All diese Verfahren befinden sich jedoch in der Transformation aus der Forschung heraus in erste industrielle Anwendungen, weshalb dies noch nicht in einen Vergleich der bestehenden Verfahren gesetzt werden kann (FfE München, 23.04.2019).

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat im Zusammenhang der Wasserstofferzeugung „eine kleine Wasserstoff-Farbenlehre“ initiiert. Denn nicht nur die Elektrolyseverfahren sind Kostentreiber der Herstellung, sondern auch die Herkunft des Stroms ist entscheidend. Hiernach lassen sich die Wasserstoffherstellungsverfahren ebenfalls in vier Gruppen unterteilen. (1) Der grüne Wasserstoff wird emissionsfrei aus erneuerbaren Energien erzeugt. Hierfür sind Quellen aus Wind-, Sonnen- oder Gezeitenkraft erforderlich. (2) Der blaue Wasserstoff wird aus fossilen Brennstoffen produziert, mit dem Unterschied, dass entstandenes CO_2 abgeschieden und gespeichert wird, auch bekannt als Carbon Capturing and Storage (CCS).

[2] Anmerkung: Trinkwasser ist Reinwasser, das mit Mineralien und Fremdstoffen versetzt wurde.

Ein Ausstoß in die Atmosphäre wird somit vermieden, wobei weitere Folgen, wie etwa eine Übersäuerung des Bodens, ungeklärt sind. Insbesondere Erdgas wird durch Zunahme von Wärme in einem Dampfreformierungsverfahren in H_2 und CO_2 umgewandelt. Erdgasfelder bieten sich somit als CCS-Flächen an, da durch eine Einspeicherung des Gases der Förderdruck erhöht wird. Dies gilt analog auch für Ölfelder. In Norwegen ist CCS Anlass für ein neues Geschäftsmodell, indem CO_2 unter dem Wasser in Sandstein eingelagert werden soll. (3) Der graue Wasserstoff verlagert lediglich den Standort der Emissionserzeugung. Der blaue H_2 wird ebenso aus fossilen Brennstoffen gewonnen, jedoch wird das CO_2 nicht aufgefangen oder gespeichert. (4) Zuletzt gibt es den türkisen Wasserstoff aus erneuerbaren Energien. Dieser wird durch die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt. Im Gegensatz zum gasförmigen Endprodukt des CCS liegt dieses als Feststoff vor (BMBF, 02.03.2022).

Unabhängig von der Farbenlehre wird grüner H_2 auch synonym für klimaneutralen Wasserstoff verwendet. Trotz unterschiedlicher Herstellungsfahren sind alle „Wasserstoffarten“ farblos und je nach Reinheitsgrad von identischer Beschaffenheit. Die Farben sollen lediglich die Nachhaltigkeit der Verfahren symbolisieren und sind bisher nicht bindend festgelegt. Ebenfalls relevant für die Betrachtung der Effizienz sind die Wirkungsgrade (siehe Abb. 1), denn jede weitere Umformung führt durch Energieineffizienzen zu Verlusten (Tjarks, G., 2017, S. 30 ff und S. 111 ff.).

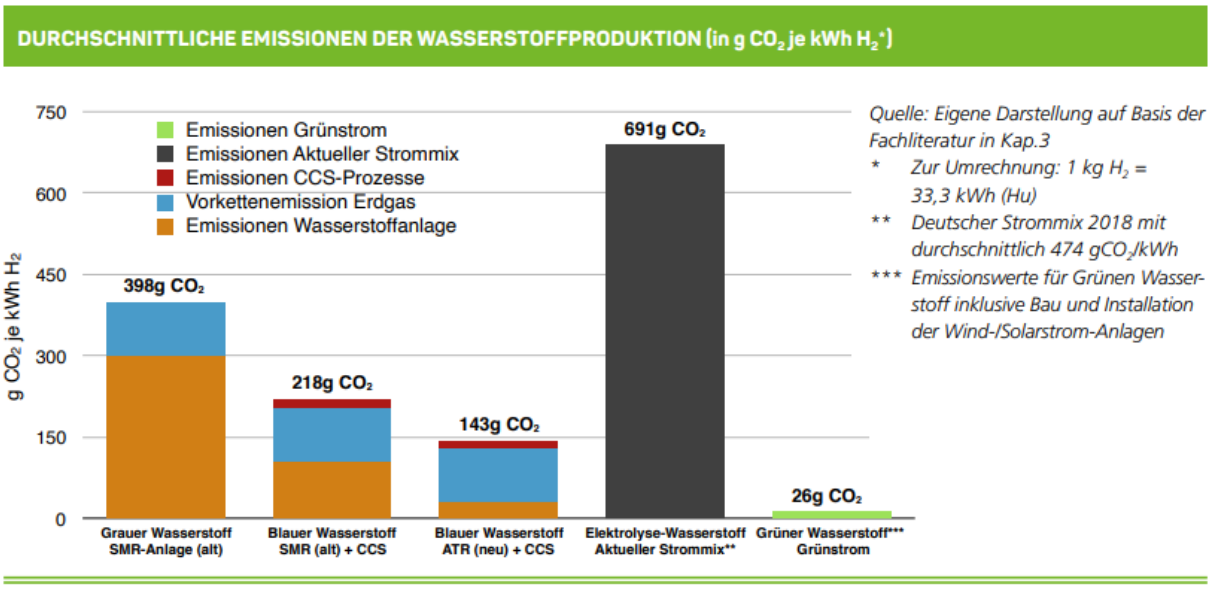


Abb. 1: Emissionen der H_2-Derivate

Quelle: Greenpeace Energy EG, 01.2020, S. 9

Marktführer in der gesamten horizontalen und vertikalen Wertschöpfungskette in der Zulieferung von Elektrolyseuren, wie ThyssenKrupp Uhde und Siemens, haben den Trend frühzeitig erkannt und eigene Produktlinien auf Grundlage der PEM-Technologie entwickelt, wie etwa den Silyzer (Siemens-Elektrolyze-System) (Siemens AG, PM, 30.06.2015).

2.2 Power-to-X

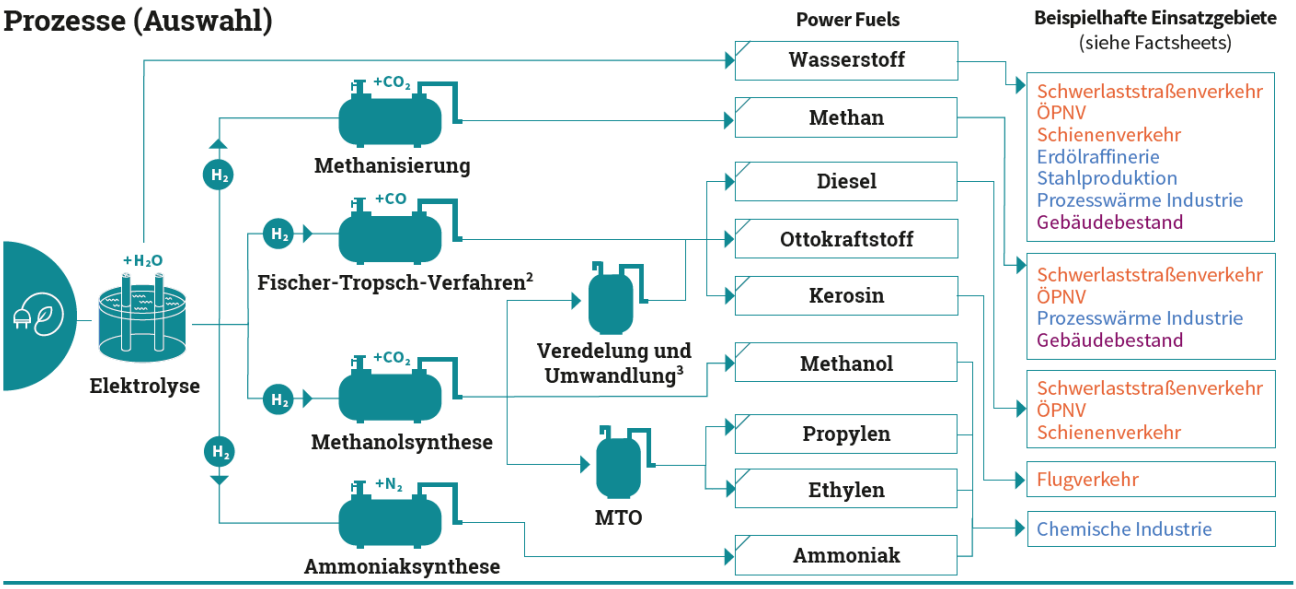
Power-to-X (PtX, auch P2X) ist ein Sammelbegriff für sämtliche Verfahren, die Elektrizität aus erneuerbaren Energien in chemische Energieträger umwandeln. Es wurde eingangs erwähnt, dass die Herstellung des gasförmigen Wasserstoffs weniger problematisch ist als die Möglichkeiten des Weitertransports. Um Letzteres zu verbessern, sollen insbesondere die PtX-Produkte die avisierte Sektorenkopplung ermöglichen, indem Emittenten im Verkehrs- und Wärmesektor durch strombasierte Kraftstoffe substituiert werden. Auf den ersten Blick scheint dies eine sinnvolle Lösung darzustellen, denn insbesondere die Integration des Wasserstofftransports in bestehende Infrastrukturen soll dabei möglich sein.

Mit neuen Wasserstoffträgern oder Wasserstoffderivaten und der Transformation in andere Aggregatzustände (hier flüssig oder gasförmig) treten neue Herausforderungen oder Ineffizienzen auf. Während verflüssigter Wasserstoff (LH_2) bei einem Bar atmosphärischem

Druck und einer Temperatur von -253°C transportiert werden muss, sind dies z.B. bei flüssigem Ammoniak -33°C oder +20°C bei knapp 10 Bar Druck. Die Temperaturveränderung verläuft zwar nach Trägerart (Carrier) monoton, jedoch ergeben sich aufgrund des Speicherdrucks unterschiedliche Dichten. Ammoniak wirkt in gasförmiger Form jedoch als starkes Zellgift. Die optimale Lösung wäre ein nicht-toxischer Stoff, der unter atmosphärischem Druck verflüssigt und bei einer Idealtemperatur von 20°C transportfähig wäre. Alle gängigen Verfahren verletzen jedoch eines dieser Prinzipien, weshalb die Ausrichtung darauf liegt, welcher Carrier, trotz einer Transportkette, am Ende die höchste Effizienz aufweist. Damit ist die Energieabgabe in Kilojoule (kJ) pro Nm^3 oder Liter gemeint, unter Berücksichtigung aller erforderlichen Transformationsschritte von der Elektrizität über die Wasserstoffelektrolyse bis hin zum finalen Verfahren, aus dem sich die electricity Fuels (eFuels) ergeben.

Das Technological Readiness-Level (TRL) drückt die Marktreife und Leistungsfähigkeit einer Technologie auf einer Skala von eins bis neun aus. Laut der Deutschen Energie-Agentur befinden sich die Reifegrade für die PEM (TRL 8) und die AEL (TRL 9) knapp über der Marktfähigkeit des Syntheseverfahrens von eFuels. Aus diesem Grund und dem Bedarf von weiteren Informationen, Erfahrungen und Tests werden die DNV-GL-Richtlinien für Schiffe in einem Handbuch fortgehend weiterentwickelt. Neue Vorschriften, Richtlinien und HAZIDs für Wasserstoff in der Schifffahrt müssen (weiter-)entwickelt und stetig verbessert werden, beispielsweise in Bezug auf Vermeidung von Feuer, Explosion und Exposition oder im Rahmen einer Betankungs-Guidance (DNV, 06.2021, S. 6 ff.).

In diesem Zusammenhang steht die „Well-to-wheel"- oder auch „Tank-to-wheel"-Kritik, die die benötigte Gesamtenergie, beispielsweise in Kilowatt pro Einheit des finalen Treibstoffs, angibt. Dabei werden etwaige Regasifizierungsprozesse eingepreist, die erforderlich sind, um tiefkalte (kryogene) Temperaturen über größere Distanzen zu halten, wie es z.B. beim LH_2 nötig ist. Infolge dessen sinkt die Menge mit der Strecke. Ebenso werden Verfahren kritisiert, die eine Rückverstromung beinhalten. Dies ist eine temporäre Änderung des Aggregatzustandes, wie etwa H_2 zu LH_2, um diesen dann nach dem Transport rückzuverstromen und am Zielort einsetzen zu können. Hier gilt erneut: Je öfter eine Umformung erfolgt, desto mehr Energieverluste hat dies zur Folge. Als Grobwert wird eine Wirksamkeit von 70 % genannt, was mit jedem Schritt 30 % Effizienzverlust der Ausgangsmenge bedeutet. Hinzu kommt, dass je nach Treibstoff weiterer Feedstock benötigt wird. Bei der Ammoniaksynthese (TRL 7) und Methanolsynthese (TRL 8) bedeutet dies eine notwendige Bindung von Stickstoff oder Kohlenstoff aus der Umgebungsluft oder industriellen Anlagen. Abbildung 2 verdeutlicht diese Prozesse.



1 Power to X beinhaltet: Power to Gas (Wasserstoff und synth. Methan), Power to Liquid (synth. Diesel, Ottokraftstoff, Kerosin) und Power to Chemicals (Chemikalien). Power to Heat und Power to Mobility sind hier nicht inkludiert.
2 Beinhaltet: Fischer-Tropsch-Synthese, Hydrocracken, Isomerisierung und Destillation. 3 Beinhaltet: DME/OME-Synthese, Olefin-Synthese, Oligomerisierung und Hydrotrating.

Abb. 2: Prozesse der Elektrolyse

Quelle: Deutsche Energie-Agentur (DENA), (06.2018)

Anmerkung: MTO = Methanol to Olefine

Weitere Technologien im Zuge der PtX sind Power-to-Heat, Power-to-Gas, Power-to-Steel sowie Power-to-Liquid, welche sich mit der Energiespeicherung, Energieverteilung und Sektorenkopplung befassen (DLR, TUHH, JBV, 10.08.2021). Für die Schifffahrt wird die Effizienz der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) durch die Verbrennung von H_2 betont. Als paralleler thermodynamischer Prozess entsteht nutzbare Wärme für weitere Verbraucher, etwa an Bord eines Schiffes (VSM, 12.2016, S. 22 f.).

Anhand der Effizienzen zeigt sich, dass eine prinzipielle Übertragbarkeit in bestehende Infrastrukturen nicht möglich ist und nach aktuellem Stand der Forschung lediglich durch gasförmigen Wasserstofftransport in Pipelines erfolgen kann (Brinner, A., et al., 13.04.2018, S. 44 ff.). Doch auch hier sind Individualentscheidungen, Begutachtungen und ggf. Retrofittings durch Inlays, Verstärkungen, Austausch oder gar der Neubau nötig. Der Überseeverkehr gestaltet sich schwieriger, doch wie soll der Wasserstoffexport aus Elektrizitätsüberschussländern nach Deutschland gelangen? Es zeichnet sich ab, dass es keine pauschale Lösung geben wird. Stattdessen ergeben sich Nischenlösungen. Für die maritime Wirtschaft bedeutet dies Treibstoffe nach Größenklasse und Reichweite, wobei Schiffe zwar LH_2 transportieren könnten, jedoch selbst mit verflüssigtem Ammoniak (LNH_3) oder auch Methanol angetrieben werden. Maersk wird durch eine initiale Bestellung ein First-Mover sein. In weiteren Bereichen der Infrastruktur gibt es Defizite. Es gibt eine überschaubare Menge von Wasserstoffverflüssigungsanlagen in Deutschland und Europa (Brinner, A., et al., 13.04.2018, S. 44 ff.). Gleichzeitig gibt es Studien, die eine substanzielle Kostensenkung und einen Effizienzfortschritt mit dem Ausbau dieser Nischentechnologie prognostizieren (Cardella, U., et al., 2017). Die Anlandung in deutschen Häfen ist aktuell schwierig, denn für das Beladen und Löschen der Schiffe werden spezielle Terminals benötigt. Eine Kurzstudie der TU Hamburg-Harburg besagt, dass ein Flüssigerdgas-„LNG"-Terminal mittelfristig auf LH_2 umgestellt werden kann, doch auch diese Strukturen bestehen noch nicht. Mögliche Projekte in Wilhelmshaven, Stade, Brunsbüttel und Rostock befinden sich de facto in der politischen oder regulatorischen Schwebe. Zugleich bilden diese Häfen mit Bremen/Bremerhaven und Lübeck die wichtigsten deutschen Häfen ab, an denen über 82 % des deutschen Seegüterumschlags erfolgen (BMVBS, 06.2013, S. 51 ff.). Die Konrad-Adenauer-Stiftung fordert in ihrem „Reality Check" signifikante Infrastrukturinvestitionen. Präzise steht dort: *„Es herrscht Skepsis, ob sich die politischen Entscheidungsträger der diesbezüglichen Herausforderung bewusst sind."* (EPICO Klimainnovation, 2021, S. 4 ff.).

3. Institutioneller Hintergrund

3.1 Europäische Union

Der Dachverband Hydrogen Europe ist die Interessenvertretung für die Industrie und Forschung mit Wasserstoff- und Brennstoffzellenbezug. Sowohl Hydrogen Europe (Industrie), als auch Hydrogen Europe Research (Forschung) vermitteln das Wissen und die Entwicklungen an die Europäische Kommission und beantragen im Gegenzug Fördergelder. Hierfür wurde eine öffentlich-private Partnerschaft gegründet, die sowohl Vertreter der Europäischen Kommission, Hydrogen Europe und Research sowie eine Vielzahl von Industrieunternehmen umfasst, die gemeinschaftlich ein Vergabegremium bilden. Die Europäische Kommission fordert dabei als „oberstes Ziel […] die Entwicklung von sauberem, erneuerbarem Wasserstoff, bei dessen Erzeugung hauptsächlich Sonnen- und Windenergie zum Einsatz kommen, da dadurch das Ziel der Klimaneutralität in der EU langfristig am besten unterstützt wird.“ (Europäische Kommission, Strategiepapier, 08.07.2021).

Mehr als eine Milliarde Euro in über 246 Projekten wurde seit der Gründung 2008 aufgewendet, wobei die Industrie einen finanziellen Beitrag in gleicher Höhe geleistet hat (FCH Europa, 2019, S. 6 ff.). Aus der Kooperation entstand 2019 eine Hydrogen Roadmap für Europa, an der sowohl Wasserstofferzeuger (wie Air Liquide) als auch industrielle Anwender (wie die Salzgitter AG) beteiligt waren. In der Roadmap wird die Vision des Energiewandels beschrieben und der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft skizziert. Anlass sind sowohl das 2-Grad-Celsius-Klimaziel im Vergleich zum vorindustriellen Niveau, welches inzwischen als 1,5-Grad-Celsius-Ziel erhöht wurde. Es soll bis 2030 umgesetzt werden und entspricht Emissionsvermeidungen von 280 Mt CO_2. Dies erfordert nach dem Pariser Abkommen und der Conference of Parties (COP21) eine radikale Veränderung des Energiemarkts mit dem Ziel der Dekarbonisierung. Aufgrund der bereits in Abschnitt 2 und 3 erwähnten Vorteile in der Erzeugung und Speicherung, wird H_2 als Hoffnungsträger der Transition gehandelt. Das Ergebnis der Roadmap umfasst eine achtteilige Handlungsempfehlung. „Im Verkehrswesen ist Wasserstoff die vielversprechendste Dekarbonisierungsoption für Lkw, Busse, Schiffe, Züge, große Autos und Nutzfahrzeuge [...]. Der Verkehrsbereich macht etwa ein Drittel aller europäischen CO_2-Emissionen aus.“ (FCH Europa, 2019, S. 14 ff., Übersetzung durch den Erstautor). Konkrete Ziele sind vergleichbare Betankungszeiten, der Reichweitenausbau, möglichst geringfügig erforderliche Änderungen in der Umstellung von Fahrzeugen (auch Schiffen) sowie langfristig sinkende Energieerzeugungskosten.

Aus der europäischen Kommission wurde zudem ein Fachgremium, die Europäische Allianz für sauberen Wasserstoff, gebildet, welche das Potenzial der Wasserstoffindustrie entfalten soll (Europäische Kommission, o. J.). Zudem sollen die Industrie und Regierungsbehörden weiterhin an Wasserstoff- und Brennstoffzellenentwicklungen arbeiten. Rein nationale Regelungen haben im Seeverkehr wenig Wirkung, denn die Schifffahrt ist international geprägt. Die Schifffahrt wurde unterschwellig adressiert, da auf die Internationale Seeschifffahrts-Organisation (IMO) und deren Ziele als Referenz zurückgegriffen wird. Künftig sollen Regierungsbehörden zusätzliche Maßnahmen in Häfen, Flüssen und Seen unterstützen und festlegen, welche die Wasserstoff-Infrastruktur und deren Hochlauf begünstigen. Die meisten Vorschriften werden in puncto Sicherheit, Technik, Gefahrenabwehr und Effizienz im Schiffsverkehr formuliert. Eines der wichtigsten Abkommen ist das MARPOL-Übereinkommen, welches fortlaufend die Verschmutzung der Weltmeere reguliert. Aufgrund der Roadmap unterzeichneten 24 der ehemals 28 EU-Mitgliedstaaten eine Absichtserklärung, das „Manifesto for the development of a European ‚Hydrogen Technologies and Systems‘ value chain“ (Europäische Kommission, 2020). Hierbei wurden sechs Schlüsselbranchen identifiziert, wobei das Transportwesen eine ist, worunter die Schifffahrt fällt. Auf Grundlage des Manifesto sollen IPCEI-Hydrogen-Projekte (Important Project of Common European Interest) in den jeweiligen Ländern gefördert werden.

Dies sind herausragende und staatenübergreifende Projekte, die durch eine Kofinanzierung positive Spill-over-Effekte in der gesamten EU bewirken sollen. Das BMWK koordiniert im Rahmen der NWS die Projekte in Deutschland (PTJ, 09.06.2021). Darüber hinaus wurde ein Hydrogen Council in Brüssel gegründet, welcher eine globale, von CEOs geleitete Initiative von 92 führenden Energie-, Transport-, Industrie- und Investmentunternehmen mit einer gemeinsamen und langfristigen Vision zur Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft ist (Hydrogen Council, 20.01.2020, S. 26 ff.). Aus der Roadmap ist zu entnehmen, dass die ambitionierten Ziele zur Etablierung der H_2-Technologien in die jeweiligen Transportsektoren bereits in Verzug sind und die gesteckten Ziele für den Transport in der Schifffahrt im Sinne von „business as usual“ ebenfalls verfehlt werden.

3.1.1 Green-Deal und Fit for 55

Infolge der politischen Selbstverpflichtung, die THG-Emissionen zu senken, dem Green Deal (2019), folgte seitens der Europäischen Kommission ein Maßnahmenpaket unter dem Namen „Fit for 55“ (2021). Die „55“ zielen dabei auf die Reduzierung der THG bis 2030 im Vergleich zu 1990 um 55 % ab. Enthalten sind 13 Richtlinien und Verordnungen, die eine Normierung und Unterstützung darstellen sollen. Im Falle der maritimen Wirtschaft sind insbesondere Modernisierungs- und Innovationsfonds von Bedeutung, um eine Technologieentwicklung zu ermöglichen.

Eines der Ziele ist die Überarbeitung des EU-Emissionshandelssystems (EU-ETS). Die Reformierung zielt darauf ab, Emissionszertifikate auf die Luft- und Schifffahrt auszuweiten. Dabei sollen die Veränderungen nicht nur Schiffe (über 5.000 BRZ) betreffen, sondern alle Schiffe, die in der EU festmachen, folglich auch Drittflaggen. Wie in anderen THG-Zertifikatsmärkten soll die Anzahl der Zertifikate jährlich reduziert werden und somit Emissionen verteuern. Deloitte schätzt, dass knapp zwei Drittel der Schiffe dieser Größenordnung sich in oder über die EU hinausbewegen (Deloitte, 14.07.2021, S. 1 ff.). Des Weiteren wird über eine Ausweitung des Zertifikathandels auf Zwischenprodukte über den Seeweg diskutiert. Bisher werden diese im Zuge des Verursacher- statt Verbraucherprinzips den Herstellungsländern zugerechnet (VBW, 12.2022, S. 64 ff.). Unter Berücksichtigung der momentanen fossilen Antriebsmittel ist der Ausgang offen. Durch die relative Verteuerung könnte das Handelsvolumen abnehmen und sich somit Produktionsstandorte und Handelsrouten verschieben oder auch eine Beschleunigung „sauberer“ Technologien zur Folge haben. Insbesondere Schwertransporte von Stahlerzeugnissen aus dem indischen und asiatischen Markt, welche derzeit aus Kostengründen rentabler sind, könnten betroffen sein. Dies stellt ein Paradoxon dar, da der Stahl gerade im Sektor der erneuerbaren Energien benötigt wird, entweder für die Anlagen selbst oder für Spezialfahrzeuge zur Ausbringung.

Des Weiteren sieht das „Fit for 55“-Paket eine Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe vor, welche jedoch bisher stark auf die H_2-Automobilität ausgerichtet ist (Europäisches Parlament, 12.2021). Das einzige nationale Projekt für Schiffe mit alternativen Antrieben im Binnenverkehr ist das Schubboot Belhala Elektra (MariGreen, Interreg, Feasibility Study, 10.2018, S. 33 f.). In dem „Fit for 55“-Paket sind Infrastrukturen für alternative Kraftstoffe aufgeführt (AFID/AFIR), welche alle 400 Kilometer eine „angemessene Anzahl“ an Schiff-Betankungsstellen sowie LNG-Infrastrukturen im Trans-European Transport Net (TEN-T) vorsieht.

Für den Seeverkehr gibt es bisher in der EU keine einheitliche Regelung. Dies liegt an mehreren Faktoren (DWV-Mitteilungen, 01.2022, S. 14 f.). Es mangelt an Klassifizierungen für neue Technologien, wie etwa durch den DNV-Germanischen Lloyd oder der Notwendigkeit von Redundanztechnologien aufgrund neuer Technologien (DNV-GL, 2019, S. 14 ff.). Doch insbesondere die Unterstützung für alternative Kraftstoffe in der Seeschifffahrt wird kritisiert. Jacob Sterling ist Head of Decarbonisation Innovation & Business Development bei A.P. Moller-Maersk, der weltgrößten Containerschifffahrtsreederei, und sagte selbst im Rahmen einer Diskussionsrunde: „Ein Teil unserer Kundschaft ist bereit, höhere Kosten für klimaneutrale Schiffe zu akzeptieren und zu bezahlen. Auch wir von Maersk wollen diesen Schritt gehen, klimaneutral werden und Emissionen vermeiden, jedoch benötigt dies klare Richtlinien. Solange wir jedoch die Einzigen bleiben, die diesen Schritt gehen, bleiben wir wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig.“ (CIMAC, 11.02.2022, Übersetzung des Zitats durch den Erstautor).

Gemeint sind die Risiken des First-Movers, welches mit dem „Henne-Ei-Problem“ vergleichbar ist. Auf der einen Seite herrscht Bereitschaft, die Umstellung mitzugehen, auf der anderen Seite wird dies einheitlich und für alle gefordert. Klar ist, dass Reedereien den bestmöglichen Zeitpunkt der Umstellung abpassen wollen, um bei einem Umstieg der Technologien auch von Fördergeldern, wie etwa dem Innovationsfonds, zu profitieren. Es herrscht beidseitige Unsicherheit von Staaten und Unternehmen bezüglich künftiger Kosten, dem Bedarf, der Zahlungsbereitschaft und Entwicklungskosten. Hinzu kommen neue Infrastrukturen, die benötigt werden (Öko-Institut Berlin und Fraunhofer ISI, Studie BMWi, 2015, S. 437 ff.). Trotz dieser Situation hat A.P. Moller-Maersk eine initiale Bestellung von zwölf Container-Schiffen ausgelöst, welche mit wasserstoffbasiertem Methanol fahren sollen. Bereits im Jahr 2023 soll das erste Schiff verfügbar sein, sodass auch Verträge über die Beschaffung von Komponenten der Methanol-Versorgungskette in Dänemark getroffen wurden (Maersk, News, 24.08.2021). In diesem Zuge erscheint es nicht irrrelevant, dass die Chemiefabrik in Stade „DOW“ (DOW, 27.09.2019) als ein Gewinner des Ideenwettbewerbs „Reallabore der Energiewende“ hervorging und jährlich 200.000 Tonnen grünes Methanol produzieren möchte. Es ist das bisher weltweit größte Projekt dieser Art (BMWi, 2019).

3.1.2 Von einer europäischen zur nationalen Roadmap

Die Komplexität der für die Schifffahrt geltenden Richtlinien wird erst durch die nationalen Regelungen ersichtlich. Es gibt keine weltweit rechtsprechende Institution für Gesetze in der Seeschifffahrt. Das wichtigste Mittel für eine erfolgreiche Durchsetzung von Rechten ist die Sanktionierung. Es gibt jedoch die International Maritime Organization (IMO), welche eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen ist. Ihr Ziel ist es, für eine Verbesserung der maritimen Sicherheit zu sorgen und Verschmutzungen durch die Schifffahrt zu vermeiden. Diese Handlungsanweisungen unter internationaler Verständigung werden anschließend in (supra-)nationalen Rechtsprechungen aufgenommen, womit diese für den europäischen Markt oder die nationale Binnenschifffahrtsverordnung gelten. Letztgenannte orientiert sich an relevanten Marktakteuren, wie der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR).

Auf diesem kleineren Testgebiet, dem Rhein, werden durch die ZKR neue Technologien berücksichtigt. Der momentane Fokus liegt dabei auf Technologien mit einem TRL von 5 oder höher. Ammoniak wird als vielversprechendste Technologie gehandelt, wobei auch weitere Technologien und Träger künftig zum Einsatz kommen könnten, sodass technologieübergreifende Übergangsszenarien entwickelt wurden (ZKR, 09.12.2021, S. 12 f.). Aus diesem Grund hat sich ein deutsch-niederländisches Konsortium mit Unterstützung der EU zusammengefunden, um im ersten Schritt die Nutzung von Wasserstoff als Antriebsmittel in der Binnenschifffahrt zu thematisieren. Zugleich bedarf es neuer Antriebssysteme, die mit H_2 betrieben werden können. Das Ergebnis der Studie sieht Antriebe basierend auf H_2 und seinen Derivaten als vielversprechende Zukunftstechnologie an.

Zudem werden die Möglichkeiten der Sektorenkopplung durch die Netzstabilität in Dunkelflauten und gleichzeitigem Ausnutzen erneuerbarer Energien positiv bewertet, zumal eine Verfügbarkeit für Regionen an Binnenschifffahrtsstraßen gewährleistet werden könnte. Neben der Debatte um eine Instandsetzung existierender Pipelines wird zugleich die Empfehlung ausgesprochen, die H_2-Produkte in der gelieferten Form in Häfen zu speichern, um Effizienzverluste zu vermeiden. Insbesondere die Benelux-Länder sowie Frankreich und Deutschland können einen erheblichen Teil über die Binnenschifffahrt abwickeln (MariGreen, Interreg, Feasibility Study, 10.2018, S. 5 ff.). Außerdem sind laut der Studie LNG-Terminals eine zielführende Übergangstechnologie. Während Anfang Februar 2022 zur Debatte stand, ob generell einer der drei seit knapp 15 Jahren thematisierten LNG-Terminals gebaut werden soll, sind seit dem am 20. Februar 2022 ausgebrochenen Russland-Ukraine-Krieg und der Beendigung des Nord-Stream 2-Vorhabens alle drei Terminals eine mögliche Option. Dies bezieht sich auf die Standorte Wilhelmshaven, Rostock und die Elbe-Region, wo es ein enges Ringen zwischen Stade und Brunsbüttel gibt (Abb. 3). Dies könnte wiederum Einfluss auf das Vorhaben in Hamburg Moorburg ausüben. Eine Studie der TUHH beschäftigt sich mit der mittelfristigen Umrüstung eines LNG-Terminals hin zum H_2-Terminal (Energate, 15.07.2021). Dies deckt sich mit der MariGreen-Studie über die Transformationsrolle des LNGs.

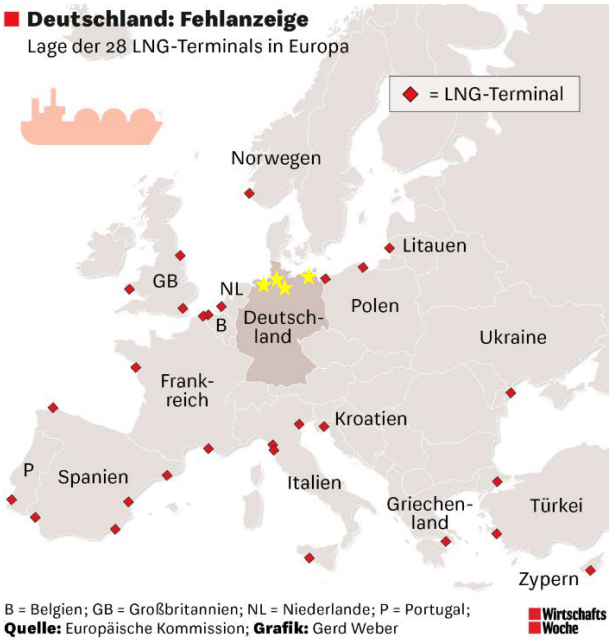


Abb. 3: Lage der 28 LNG-Terminals in Europa

Quelle: WirtschaftsWoche, (21.01.2022).

★ Eigene Erweiterung der Darstellung. Zur Disposition stehende Standorte sind Wilhelmshaven, Brunsbüttel, Stade und Rostock (von links nach rechts).

3.2 Die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS)

Die Nationale Wasserstoffstrategie wurde im Juni 2020 durch das BMWi bekanntgegeben und befasst sich thematisch mit den unter Abschnitt 1 bis 3 erwähnten Vorteilen des Wasserstoffs in den Zielsektoren Wärme, Verkehr, Elektrizität sowie Stahl und Chemie. Eine Erkenntnis der Notwendigkeit für PtX-Produkte ist eine nicht darstellbare elektrische Versorgung auf See (BMWi, 06.2020, S. 6 ff.). Laut der Strategie sei eine langfristige Nachfrage nach klimaneutralen und wasserstoffbasierten Treibstoffen im Luft- und Seeverkehr unausweichlich. „Im Luftverkehr sowie in der Küsten- und Binnenschifffahrt können je nach Einsatzbereich auch Brennstoffzellen sowie batterieelektrische Antriebe zur Anwendung kommen. Diesbezüglich muss die technische Entwicklung aber noch abgewartet werden.“ (BMWi, 06.2020, S. 20 ff.).

Bisherige Bestrebungen für einen Hochlauf des Wasserstoffmarkts im Verkehr kamen vermehrt durch öffentliche Auftraggeber sowie von Universitäten zu Forschungszwecken. Von aktuell knapp 1200 H_2-Fahrzeugen in Deutschland sind über die Hälfte gefördert oder im öffentlichen Dienst unterwegs, weshalb dies nur schwer als Erfolg für einen kommerziellen Markthochlauf gewertet werden kann (vgl. Hintergrund: H_2-Fahrzeuge in Deutschland). Ebenso sind Wasserstoffbusse öffentlicher Träger nach Ablauf der Studienzeit vom Netz genommen wurden, so etwa in Hamburg. Diese Entwicklungen beobachtend fordern Vertreter des maritimen Sektors mehr Unterstützung in der Umstellung der Schifffahrt ein, welche nicht nur monetär, sondern auch durch klare Gesetzgebungen erfolgt. Aus dem Maßnahmenkatalog des BMWi geht nicht hervor, dass der maritime Sektor eine Doppelfunktion innehat. Die bereits erwähnte THG-Vermeidung der Schiffe geht mit der Etablierung einer Versorgungsstruktur einher.

Während die NWS eine vergleichsweise grobe Orientierung liefert, sind die Teilvorhaben klarer abgegrenzt. Das NIP I-Vorhaben sowie dessen Fortsetzung sind ein fester Bestandteil des Maßnahmenkatalogs der NWS und veranschaulichen den verästelten Aufbau (NOW GmbH, 10.2021, S. 29 ff.). Es sollen ebenfalls Förderungen mittels Energie- und Klimafonds (EKF) für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien intensiviert werden. Die insgesamt 3,6 Mrd. Euro sind bis 2023 befristet und auf weitere Wasserstoffanwendungen und Technologien anwendbar. Aus diesem Grund erhalten auch F&E-Aktivitäten Förderungen, um eine weitere Kostenreduktion zu erreichen. Der folgende Auszug gewählter Maßnahmen im Verkehrswesen zeigt die für den maritimen Sektor relevanten Größen auf: Als einer der Hoffnungsträger wird das Programm „HyLand – Wasserstoffregionen in Deutschland“ aufgeführt (Maßnahme 6). Maßnahme 13 wirkt wenig bedeutend, doch der Inhalt hinter diesem Einzeiler ist vermutlich existenziell für den Erfolg der Wasserstoffwirtschaft: „Einsatz für die internationale Harmonisierung von Standards bezüglich Mobilitätsanwendungen für Wasserstoff- und Brennstoffzellensysteme (z. B. Betankungsstandards, Wasserstoff-Qualität, Eichung, Wasserstoff-KFZ Typengenehmigung, Zulassung von Schiffen etc.)“ (BMWi, 06.2020, S. 21 f.). Die Regelungen und Standards gelten für jeden Teilbereich des Wasserstoffs. Dies betrifft neue Klassifizierungen von Häfen über etwaige Terminals, sowohl für LNG als auch H_2-Derivate. Beide Formen existieren in Deutschland bislang nicht. Die Typengenehmigungen für den Transport von H_2, LH_2, NH_3 und weiterer gibt es zwar, jedoch betrifft dies Tanktainer (Tanks im Containerrahmen, vgl. VTG) oder ähnliche Gasbehälter (Agora Energiewende, Studie, 02.2021, S. 60 ff.). Das Handling und Betanken von Fahrzeugen zieht andere Dimensionen nach sich, wodurch nicht nur ausgebildete Fachkräfte, sondern z.T. Endverbraucher mit den Derivaten in Kontakt kommen. Das Zulassen von Schiffen, sog. Klassifizierungen, ist aufgrund von Redundanzvorschriften bei innovativen Technologien problematisch. Der knapp bemessene Raum an Bord sieht eine Zusatztechnologie vor, um beim Versagen der neuen Technologie die Manövrierfähigkeit des Schiffs zu gewährleisten. Diese Teildisziplinen adressieren jede Ebene vom Schiff über das Handling bis hin zum Transport und der Anwendung.

Die bereits dargelegten Informationen zeigen Problematiken im Aufbau einer maritimen Wasserstoffwirtschaft auf. Die Deckung der Nachfrage mittels Importquoten ist mittelfristig gefährdet und somit auch die avisierte Sektorenkopplung und Dekarbonisierung weiterer Industriezweige. Dies deckt sich mit der Bewertung der Konrad-Adenauer-Stiftung über die Probleme der Wasserstoffstrategie der Bundesregierung (EPICO Klimainnovation, 2021, S. 53 ff.). Kostennachteile und Risiken durch neue Technologien sowie benötigte F&E hindern die Überwindung einer „Henne-Ei-Problematik“, also eines in sich geschlossenen Wasserstoffmarkts, indem sich Nachfrage und Angebot ideal allokieren. Die Erwartungshaltung im Rahmen der „Henne-Ei-Problematik“ fordert dabei den Markteintritt der jeweils anderen Partei. Wie eine Lösung dieser Patt-Situation aussehen kann, zeigen die nachfolgenden maritimen Verbundprojekte, auch Hubs genannt. Dies sind Zusammenschlüsse aus Forschung, Industrie und Wirtschaft, die z.T. vor der Realisierung des Projekts die Parteien aus Angebot und Nachfrage vereinen.

Hintergrund: H_2-Fahrzeuge in Deutschland

H_2-Mobility, die deutsche Kraftfahrzeug-Strategie sowie die Kapazität der H_2-Tankstellen sind ebenso wie die Schifffahrt dem Verkehrswesen zugeordnet. Unter Berücksichtigung des bisherigen zeitlichen Verlaufs sind die rund 1200 deutschen Wasserstoff-Autos vergleichsweise wenig. Auffällig ist, dass lediglich 92 H_2-Tankstellen in Deutschland existieren, welche zudem unterschiedliche Bezahlsysteme aufweisen. Während der geförderte Verkaufspreis von 8,5 € pro Kilogramm nahezu überall identisch ausfällt, stellt die geringe Abnahme und die wenigen Fahrzeuge keinen Use Case für Investoren dar. Nicht nur die Tankstellen (europaweit), auch die dahinter befindliche Intrastruktur und benötigte Elektrolyseure sind kapitalintensiv. Aus Sicht der Käufer besteht bisher ein geringes Interesse, dem Markt beizutreten, da das Tankstellennetz klein ist und oft nur eine „Zapfsäule" je Tankstelle zur Verfügung steht. Dazu kommt die vergleichsweise geringe Reichweite der Fahrzeuge und die hohen Versicherungskosten.

Bemessen an den reinen Treibstoffkosten ist Benzin, wie anhand der Rechnung belegt, teurer als H_2. Diesel ist noch marginal preiswerter (um 3 ct je Liter). Unter Hinzunahme der Versicherungskosten, welche aufgrund der geringer vorhandenen Ersatzteile und kostenintensiverer Technologie höher ausfallen, steigen die laufenden Kosten von H_2-PKWs. Auch der Anschaffungspreis ist höher als bei vergleichsweise herkömmlichen PKWs. Während die Motivation in der Anschaffung von H_2-PKWs noch von Förderungen, Umweltbewusstsein oder den Status durch den Besitz angetrieben sein können, fallen im Vergleich dazu die Motive für die Errichtung von Tankstellen, respektive Elektrolyseuren, geringer aus. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass größere H_2-Abnahmen benötigt werden, um Anreize für Investoren zu schaffen. Hier stellt die Schifffahrt eine solche Abnahmegröße dar. Zugleich könnten weitere H_2-Kapazitäten der Elektrolyseure der erweiterten Mobilität wie der Kraftfahrzeugstrategie zugutekommen.

	Fahrzeugtyp	Leergewicht	Verbrauch kombiniert 100 km	Preis	pro Einheit	Tankgröße	Einheit	Reichweite in km	Treibstoffpreis pro 100 km	Versicherung (Jahr, Vollkasko)
Benzin	VW Passat 2.0 TSI	1709 kg	6,3 l	2,1	l	70	Liter	1.111	13,23 €	1.029 €
Diesel	VW Passat 2.0 TDI	1709 kg	5,2 l	1,93	l	66	Liter	1.269	10,04 €	1.524 €
H_2	Toyota Mirai	1920 kg	1,2kg	8,5	kg	5,6	kg	467	10,20 €	2.390 €

Benzinpreis, indem Benzin und H2 indifferent*	1,62 €
Dieselpreis, indem Diesel und H2 indifferent*	1,96 €

*mit 8,5€ pro kg H_2

Tabelle 1: Übersicht über ausgewählte H_2-Fahrzeugtypen in Deutschland (Stand 29.05.2022)

Quellen: https://autokosten.net/vw/passat-limousine/passat-2-0-tsi-bmt/passat-b8-limousine_17/versicherung#:~:text=Aktuell%20liegt%20die%20Typklassen%2DEinordnung,00%20Euro%20Vollkasko%20im%20Jahr (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.autokosten.net/amp/vw/passat-variant/passat-variant-2-0-tdi-bmt/passat-b7-variant-11-10-09-14_8/versicherung (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.allianz.de/auto/kfz-versicherung/rechner/#https://kraft2.allianz.de/pricing (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), Werte vom 29.05.2022, eigene Darstellung

4. Regionaler Hintergrund: Modellregionen und Konzepte

4.1 Hamburg Moorburg, Hamburg Green Hydrogen Hub

An der Elbe liegend versteht sich die Hansestadt Hamburg als Dreh- und Angelpunkt des Nordwestens Deutschlands. Nicht nur wegen des hohen Energiebedarfs, sondern auch aufgrund der Lage der Millionenmetropole sieht ein Konsortium, bestehend aus Shell, Mitsubishi Heavy Industries (MHI), Vattenfall sowie des kommunalen Versorgers Wärme Hamburg, das Potenzial zur Errichtung eines Wasserstoff-Hubs. Eine Absichtserklärung über das 100 MW-Vorhaben durch einen riesigen Elektrolyseur-Verbund wurde bereits unterzeichnet. Zugleich wurde Anfang des Jahres 2021 eine IPCEI-Förderung beantragt, wobei die Rückmeldung noch aussteht. Während man weitestgehend bestehende Infrastrukturen nutzen möchte, wie etwa die städtische Pipelineversorgung durch Wärme Hamburg, sollen darüber hinaus Grundlagen für weitere Logistikketten, Speicher- und Weiterförderungsstrukturen geschaffen werden (Vattenfall, PM, 22.01.2021). Hierzu zählen die Hamburger Hafen und Logistik Agentur (HHLA) sowie lokale Unternehmen, die sich der Absichtserklärung anschließen. Zudem bestehen 380 kV Übertragungsnetz- und 110 kV innerstädtische Netzkapazitäten. Neben der lokalen Erzeugung und Weiterverteilung des Hubs soll zudem eine Einspeisung mittels Überseeschiffen über Importterminals und Hafenanlagen erfolgen. Des Weiteren ist geplant, dass Hafenanlagen binnen zehn Jahren auf Wasserstoff umgerüstet werden und Großabnehmer ihren Bedarf umstellen. Die größten Abnehmer sind der Stahlhersteller ArcelorMittal sowie die Chemiefabrik Worlée. Durch die Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten sieht sich das Konsortium selbst als „idealen [...] [Standort] und kann sich zu einem potenziellen Startpunkt für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft entwickeln“ (Vattenfall, PM, 22.01.2021). Zwar sind Flächen mit dem Ziel der Umwidmung durch das bis 2021 bewirtschaftete Kohlekraftwerk vorhanden, allerdings wurde der Teilrückbau im Februar 2022 gestoppt, um auf aktuelle Entscheidungen in Bezug auf den Russland-Ukraine-Krieg und der daraus resultierenden Energiedefizite zu reagieren (NDR, 28.02.2022). Das oft kritisierte und knapp sechs Jahre betriebene Kohlekraftwerk, welches den Energiebedarf Hamburgs nahezu eigenständig decken konnte, soll dem Wasserstoffhub weichen.

Trotz einer Machbarkeitsstudie „Zur Konversion des Heizkraftwerks Hamburg Moorburg“ im Auftrag der hamburgischen Behörde für Wirtschaft und Innovation, sind die Bemühungen keine beschlossene Sache. Der Senat stehe grundsätzlich hinter dem HGHH, jedoch ist dies an eine Sektorenkopplung gebunden, welche wiederum von den IPCEI-Fördergeldern und einer Klärung der Transport- und Versorgungsinfrastruktur abhängig ist. Grundsätzlich sieht die Machbarkeitsuntersuchung das Vorhaben in der Errichtung eines 100 MW starken Elektrolyseurs als möglich. Hinzu käme der notwendige Aufbau eines H_2-Starternetzes (HH-WIN) der Gasnetz Hamburg GmbH, wobei umfassende Strukturen des Moorburggeländes weitergenutzt werden könnten. Wird die produzierte H_2-Menge mit dem aktuellen Bedarf ins Verhältnis gesetzt, würde dies lediglich 4 % des Hamburger Bedarfs decken. Im Umkehrschluss werden 2,6 GW weitere Elektrolyseurleistung durch zusätzliche Stack-Kapazitäten oder den H_2-Import benötigt. Ein Multiplikatoreffekt tritt ein, da nicht nur die Elektrizität auf grüne Energie umgestellt werden soll, sondern zugleich der Erdgasbedarf der Top 15 Industriebetriebe (Tilia GmbH, 09.07.2021).

Infolge der Studie wurde ein Konzept entwickelt, welches Hamburg als Drehkreuz für H_2-Importe nach Deutschland und Europa thematisiert (HH Behörde für Wirtschaft und Innovation, 02.2022, S. 31 ff.). Obwohl die Studie unter dem Leitfaden der Machbarkeit erstellt wurde und mittelfristig gewichtend in eine Entscheidung einfließen wird, wirft die Studie Fragen auf. So werden bspw. H_2-unübliche Maßeinheiten gewählt. Im Regelfall werden Preise nach Volumen per Nm^3 oder kg angegeben. In diesem Fall wird jedoch die Messgröße MWh angegeben, was zu einer Verzerrung in der Vergleichbarkeit führt (HH Behörde für Wirtschaft und Innovation, 02.2022, S. 13). Außerdem wurden Preisentwicklungen und Importkosten für Schiffe, Terminals, Pipelines sowie lokaler Erzeugung für die Zukunft bis 2050 gleichgesetzt. Da CAPEX für Pipelines und Schiffe variieren, während die OPEX bei Pipelines mit dem Volumen und der Zeit sinken, können diese langfristig nicht als identisch angenommen werden (HH Behörde für Wirtschaft und Innovation, 02.2022, S. 14). Im Vergleich mit Gestehungskosten von Elektrolyseuren laut der International Renewable Energy Agency (IRENA) liegen die Kosten der PEM dop-

pelt so hoch wie die Kosten der AEL. In der Studie beträgt die Kostenvarianz jedoch nur ein Siebtel. Des Weiteren wurden Referenzen von Elektrolyseuren verwendet, die nie errichtet wurden (HH Behörde für Wirtschaft und Innovation, 02.2022, S. 49 ff.). Sofern diese Studie also für eine Entscheidung zur Umsetzung des Gesamtvorhabens herangezogen wird, sind Mehrkosten zu erwarten.

Generell ist ein Trend wahrzunehmen, dass sich die globalen Mineralölproduzenten und Zulieferer wie Shell und BP mit regenerativen Antriebsmitteln befassen, so auch Wasserstoff. Eine eigens von Shell verfasste Studie aus dem Jahr 2017 zeigte erste Möglichkeiten eines internationalen Wasserstoffhandels und die Abhängigkeit der Transportindustrie. Das Fazit sah großen Entwicklungsbedarf bei Schienen-, Schiff- und Lufttransport, sodass im Resümee zu Förderungen der wenig einsatzbereiten Technologien aufgefordert wurde. Die Vorteile lägen in geringen Emissionen und höherer Effizienz der Brennstoffzellentechnologie gegenüber den Nachteilen in puncto Preisentwicklung und Marktreife (TRL 5-6, 2017) (Shell Deutschland und Wuppertal Institut, 15.06.2017, S. 46 ff.). Bis heute sind keine weitflächig verteilten Technologien auf Passagierschiffen, Fähren oder Containerschiffen hinzugekommen, wie in der Shell-Studie angeregt wurde (Shell Deutschland und Wuppertal Institut, 15.06.2017, S. 40 ff.). Sowohl die technische als auch preisliche Prognose über die Höhe des grünen H_2-Preises hat sich als falsch erwiesen, denn der Russland-Ukraine-Krieg hat die Entwicklung drastisch beschleunigt.

4.2 BMBF Wasserstoffleitprojekt H2Mare, Helgoland

Die Vielseitigkeit des maritimen Sektors zeigt sich nicht nur in der distributionalen Seite und der Infrastruktur, sondern auch auf der Erzeugerseite spielt der Sektor eine entscheidende Rolle. Die „Wind Resource Map“ (Abb. 4) verdeutlicht, dass in ausgewählten küstennahen Bereichen großes Potenzial zur Nutzung der Windenergie besteht (DLR, 09.2020, S. 24 ff.).

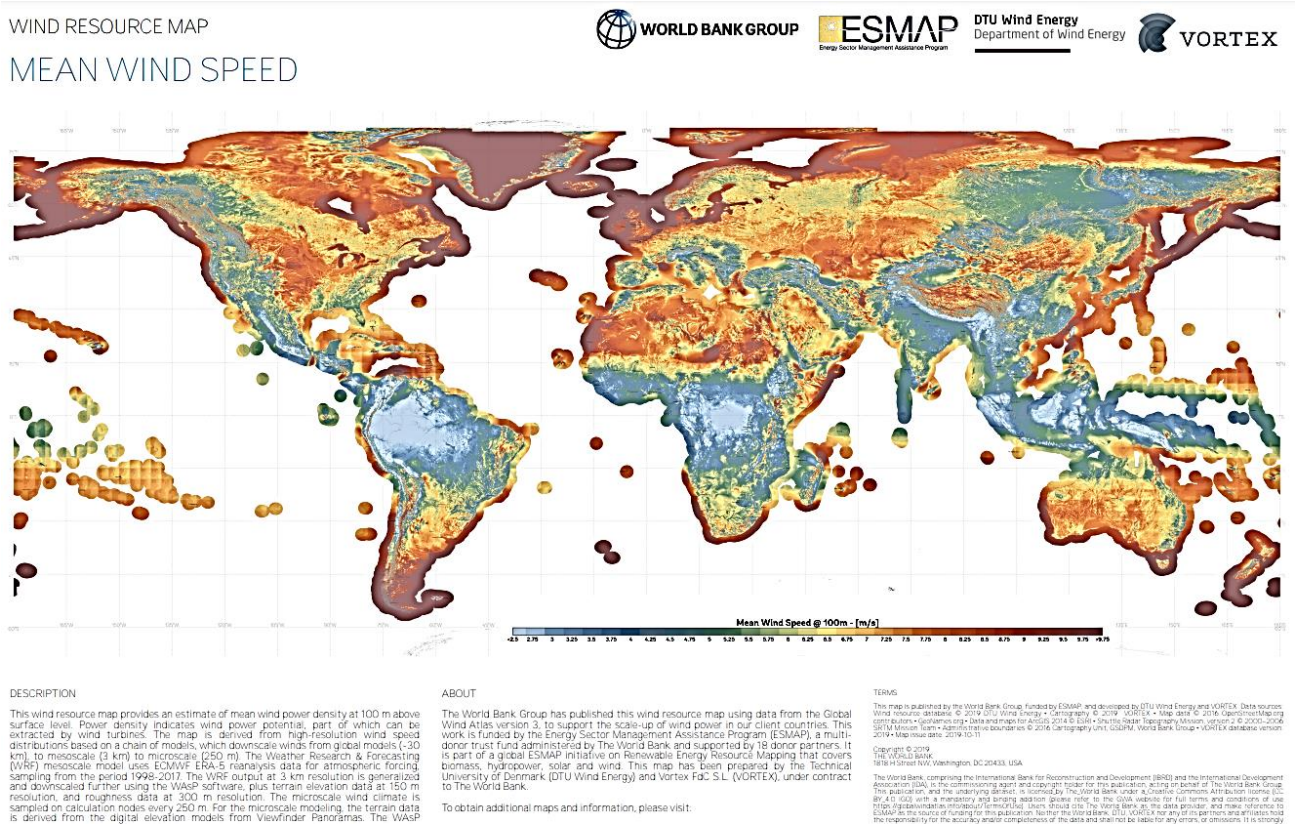


Abb. 4: Karte der weltweiten Windressourcen

Quelle: DTU WIND AND ENERGY SYSTEMS, (2019)

Während bei küstennahen Ländern eine elektrische Direktversorgung durch Windkraftanlagen möglich ist, können Binnenländer sowie der Transportsektor perspektivisch mittels H_2-Trägern versorgt werden. Eine Kostenbewertung der H_2-Transportvarianten aus 500 MW-Anlagen deutscher küstennaher Windparks bis 150 km Reichweite fällt zwischen Schiffen und Pipelines ausgeglichen aus, während Druckgas-Container teurer sind. Letztere erweisen sich allerdings als schneller verfügbar (Prognos, 28.05.2020). Je kürzer die Distanz und umso höher der Input an Windkraftanlagen, desto geringer der Bereitstellungspreis durch Pipelines.

Der Verein AquaVentus möchte mit seinem ambitionierten 10 GW-Vorhaben eine alternative Lösung anbieten und durch die Ausnutzung von Offshore-Windenergie und Wasserstoff als Energieträger längere Distanzen überbrücken. Ab 2035 sollen jährlich 1 Mio. Tonnen H_2 Offshore produziert werden. Dies umfasst die Produktion von Elektrizität durch Windenergie sowie die Offshore-Elektrolyseure von lokalen H_2-Erzeugern zur Einspeisung in ein Pipelinesystem, welches im Hafen der einzigen deutschen Hochseeinsel Helgoland mündet. Die weitere Distribution ist bislang nicht festgelegt. Während LOHC-Strategien[3] verfolgt werden, um den H_2 an transportfähige Träger zu binden und mithilfe von Schiffen weiter zu verteilen, ist der Pipeline-Weg zum Festland nicht ausgeschlossen (AquaVentus, Präsentation, 04.2021). Eine solche Zukunft zeichnet auch die Deutsche WindGuard GmbH. Demnach seien nach aktuellem Raumordnungskonzept Kapazitäten aus Offshore produziertem H_2 von 40 GW bis zu 60 GW, je nach Szenario, möglich (Deutsche WindGuard GmbH, 22.09.2021, S. 18 ff.). Neben AquaVentus hat sich zudem eine neugegründete GmbH namens cruh21 angesiedelt, welche die Projekte mit betreuen soll (cruh21 GmbH, 08.03.2022). Insgesamt gehören zur AquaVentus-Strategie viele Teilstrategien, die sich auf das Gesamtprojekt beziehen. Hierzu zählen AquaPrimus (Prototyp eines Offshore-Elektrolyseurs ab 2023), AquaPortus (LOHC Infrastruktur im Helgoländer Südhafen ab 2024), AquaSector (Koordination von Vergabeverfahren ab 2028) und AquaDuctus (Offshore Wasserstoffpipeline ab 2030). Die Vision von AquaVentus basiert auf einer GEO-Studie von 2001. Tom Trittin befasste sich hierbei mit der Wasserstoffherstellung und -versorgung im Offshore-Bereich. Gegenwärtig ist die Studie als bemerkenswert anzusehen, da der Wahrheitsgehalt der Prognosen hoch ist und bereits vor 20 Jahren aufgeworfene Fragen noch immer nicht geklärt sind bzw. während des aktuellen Wasserstoff-Hypes eruiert werden. Trittin blickte in seiner Studie 9 bis 19 Jahre in die Zukunft, wobei Wasserstoff ab 2010 in der Nordsee Offshore hätte produziert werden können. Keines dieser Vorhaben kam physisch zustande. Damals wie heute bleiben jedoch identische Fragen über H_2-Transport via Schiffe, Pipelines sowie Verladestellen, nun Terminals, offen (Trittin, T., 2004).

Durch die NWS und BMBF-Fördermöglichkeiten ergeben sich neue Rahmenbedingungen, wodurch in Kooperation mit Unternehmen wie RWE, Shell, e-on und vielen weiteren eine Realisierbarkeit näher rückt. H2Mare besteht aus vier Verbundprojekten mit 35 Partnern und ist selbst eines der drei Leitprojekte des BMBF (Stiftung Offshore-Windenergie, 22.09.2021). Hinzu kommen neue Technologien im Floating, sodass auch Offshore-Windkraftanlagen in Seetiefen über 60 m schwimmend verankert werden können und somit mehr Seeflächen nutzbar sind. Ebenso Offshore Floating Photovoltaik wird erprobt (Europäische Kommission, 19.11.2020). Vorher waren Offshore-Anlagen fest verankert. Erste Erkenntnisse zeigen, dass die CAPEX bei einer Tiefe bis zu 40 m feste Verankerungen kostengünstiger sind, während Floating ab 60 m kosteneffizienter ist. Der Übergangsbereich ist einzelfallabhängig und bedarf weiterer Untersuchungen. Eine direkte Kopplung an Elektrolyseure soll grünen H_2 ermöglichen. Die H2Mare-Projekte sollen über 100 Mio. Euro Förderung erhalten.

[3] Liquid organic hydrogen carriers (LOHC) sind flüssige organische Wasserstoffträger.

4.3 BMBF Wasserstoffleitprojekt TransHyDE, Rügen – Port Mukran

Damit das AquaVentus-Gesamtvorhaben in der Nordsee gelingt, müssen vorab komplementäre Anlagen, bestehend aus Elektrolyseur, Entsalzungsanlage und Turbine konstruiert werden. Zudem ist eine Transportinfrastruktur zu skizzieren. Hierfür kommt ein weiteres mit bis zu 12,4 Mio. Euro gefördertes BMBF-Leitprojekt zum Tragen: TransHyDE. Neben den Gasnetz-Speichern, die in dieser maritimen Betrachtung nur am Rande erwähnt werden, sind neue Technologien gefragt. H_2-fähige (Binnen)-Schiffe sowie weitere Transporttechnologien, wie etwa Tanktainer, sind gefordert. Der Vorteil der Tanktainer liegt im jetzigen frühen Stadium der Wasserstoffinfrastrukturen, da diese als Transportgut gelten. Sie können zum einen nach dem Überseetransport auf LKW, Züge oder Binnenschiffe verladen werden. Zum anderen können das Inland und periphere Regionen erreicht werden. Im Gegensatz zu Importterminals ist keine lange Planungs-, Legitimations- oder Zertifizierungsphase erforderlich, denn als Güterfracht können H_2-Tanktainer in jedem Hafen ohne zusätzliche Zertifizierungen für Bunkerstationen gelöscht werden. Demgegenüber steht ein hoher Bedarf an Stahl für die Vielzahl an Tanktainern, zumal H_2-Tanktainer weniger Kilojoule Energie speichern können, als etwa dieselbe Menge LH_2. Hier käme das bereits erwähnte Problem des hohen Energieverlustes aufgrund der Selbstkühlung auf. TransHyDE soll deshalb weitere Derivate wie LOHC oder Ammoniak umfassen und Technologien in diesem Bereich vorantreiben. Gleichzeitig müssen die Standards und Sicherheitsvorschriften für diese Technologien mitwachsen oder initiiert werden, weshalb ein Konsortium, angeführt vom DVGW, eine gemeinsame und sechs Seiten umfassende Presseerklärung zur Normung, Standardisierung und Zertifizierung der Wasserstoff-Transportinfrastruktur verkündet hat (DVGW, Presseinformation, 08.09.2021).

Im Fall von AquaPrimus handelt es sich um das erste Unterprojekt des AquaVentus-Vorhabens im Hafen von Sassnitz auf Rügen, dem Port Mukran. Neben einem von TransHyDE geförderten Gasspeicher für Wasserstoff im Hafenbereich sind dort zwei 14 MW-Windturbinen geplant, welche jeweils einen Elektrolyseur auf der Grundplattform beinhalten sollen. Die Projektpartner GASCADE, Shell und Gasunie eruieren im weiteren Verlauf Möglichkeiten der Verbindung von Offshore-Plattformen mit landseitigen Gasspeichern. Das Projekt unter dem Namen AquaPrimus soll 2025 installiert werden und befindet sich aktuell in der Konzeptionsphase (Offshore Energy, 03.05.2021).

Gleichzeitig diversifiziert RWE Renewables die F&E aus Projekten und treibt ein Demoprojekt in den Niederlanden von 300 bis 500 MW Elektrolysekapazität voran. Das H2opZee-Projekt liegt zeitlich vor dem AquaVentus-Vorhaben und könnte einen Transfer in der Technologie und Anwendung leisten. Der Projektpartner in den Niederlanden, Neptune Energy, betreibt seit 2021 erfolgreich einen 1 MW-Elektrolyseur, bestehend aus einem 40 Fuß-Container auf dem Hauptdeck einer Offshore-Plattform namens Q13-A. Insgesamt sollen 400 kg Wasserstoff pro Tag zur Verfügung stehen, welche vorerst für die interne Energiespeisung der Plattform genutzt werden. In einem weiteren Schritt erfolgt eine Einspeisung als Gas-Gemisch aus H_2 und Erdgas in bestehende Gaspipelines. Während es Offshore-Überlastungsphasen gibt, in denen mehr Strom produziert als nachgefragt wird und in Folge Windkraftanlagen gedrosselt oder abgeschaltet wurden, soll künftig in diesen Überschussphasen H_2 produziert werden (IBB Netzwerk GmbH, 26.07.2021). Für RWE und Mukran können Erprobungen über die Auswirkungen von Seeluft auf den Elektrolyseur unter realen Offshore-Bedingungen durchgeführt werden. Die Q13-A Plattform besitzt bereits eine Trinkwasserversorgung in Form einer Entsalzungsanlage. Diese erfordert ebenfalls Elektrizität. Infolge einer Wasserentsalzung verbleibt Abwasser, welches salzhaltiger als zuvor ist und eine Lauge bildet (Jones, E., Qadir, M., et al., 2019).

Je größer die Elektrolyse, desto größer wird allerdings auch der Reinwasser-Bedarf, welcher ceteris paribus salzhaltigeres Abwasser produziert. Laut Sebastian Föllner (AquaVentus, cruh21) ist die Entsorgung des Abwassers nicht vorgesehen, da ansonsten die Wirtschaftlichkeit des Projekts nicht mehr gegeben wäre. Da bisher keine Arbeiten oder Daten über den Salzwasserbedarf im Rahmen einer Offshore-Elektrolyse veröffentlicht wurden, ist das Ziel einer eigenen Darstellung, die Dimensionen der Gigawattprojekte auf den kleinen Maßstab herunterzubrechen. Insbesondere einhergehende Industrieabwasser konnten hierbei aufgrund bestehender Größen ermittelt werden. Die theoretische Berechnung erfolgte anhand der Bedarfsmengen eines 1MW H-TEC-Elektrolyseurs. Da dieser modular in einem Container verbaut ist, stellt dies die schnellste Lösung dar, um ihn bei Offshore-Windkraftanlagen auf Plattformen nachzurüsten. Damit salzhaltiges Meerwasser in Wasserstoff umgeformt werden kann, ist eine Entsalzung erforderlich, um der Wasserqualität des Elektrolyseurs gerecht zu

werden. Der Energieaufwand der Wasseraufbereitung wurde anhand eines Mittelwerts vorliegender Daten eines Bundeslandes (hier NRW) ermittelt. In diesem Fall wurde der Wasserbedarf der Umkehrosmose zur Entsalzung betrachtet, da Offshore mit keiner industriellen Abwärme (Verdampfungsmethode) zu rechnen ist. Je nach Anlagegröße (1MW / 2MW) entstehen die dargestellten Größen je Kilogramm Wasserstoff, pro Stunde oder Tag. Für einen Kilogramm Wasserstoff aus Meerwasser werden 34,67 l benötigt. Dabei entstehen 20,8 l salzhaltigen Abwassers (Lauge). Je 1MW-Elektrolyseur bedeutet dies pro Tag 15.600 l Lauge. Es gibt Aquakulturen, die diesen starken Salzgehalt benötigen und in natürlicher Umgebung absorbieren können. Fraglich ist, wie sich dies auf die Umwelt auswirkt, wenn man eine Vertausendfachung der Daten durch die benannten Gigawattprojekte berücksichtigt. Des Weiteren wird, wie eingangs erwähnt, bei der PEM-Elektrolyse Sauerstoff vom Wasser abgespalten. Im Offshore-Testbetrieb wird ebenfalls beobachtet, ob die Anlage schneller oxidiert. Zwar herrscht auf See in der Regel Wind, sodass der reine Sauerstoff verdriftet, jedoch kann dies auch diejenigen Projekte beeinflussen, bei denen Elektrolyseure direkt an Windkraftanlagen gebaut werden sollen. Tabelle 2 zeigt exemplarisch Produktion, Wasserverbrauch und Meerwasserbedarfe, um die Größenordnungen zu verdeutlichen; Abb. 5 zeigt denselben Zusammenhang graphisch, um wiederum eine bessere Nachvollziehbarkeit zu gewinnen.

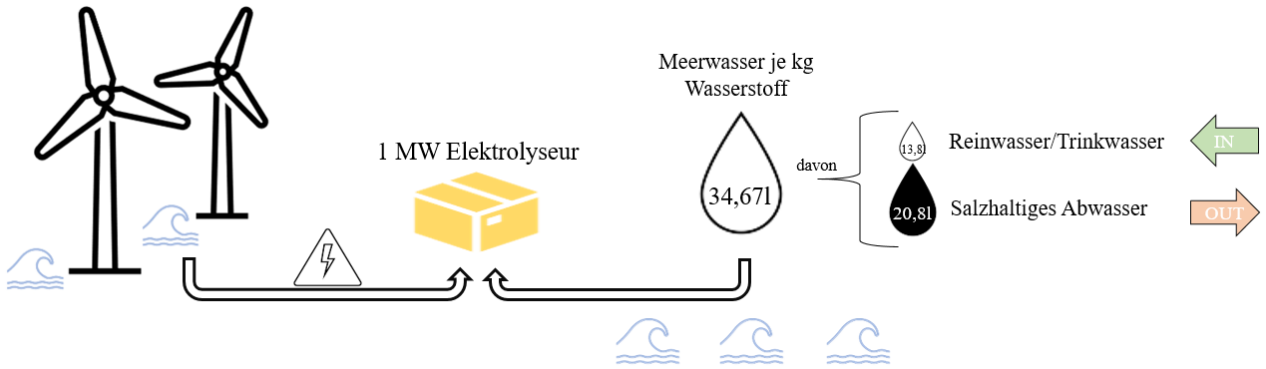


Abb. 5: Darstellung von Wasserverbrauchen

Quelle: Eigene Darstellung.

Exemplarische Rechnung anhand eines H-Tech Elektrolyseurs*	*mit 13,87 kg. Trinkwasserverbrauch je prod. kg H_2 nach Qualität 5.0 (ISO 14687:2019)				
	1 MW		**2 MW**		
	pro Tag	pro Stunde	pro Tag	pro Stunde	
H_2 Produktion nominal in kg	450	19	900	38	
Wasserverbrauch nominal in kg	6.240	260	12.480	520	
Meerwasserbedarf je prod. Menge Trinkwasser	15.600	650	31.200	1.300	2,5l pro 1 kg. Wasser
Laugenentstehung je prod. Menge Trinkwasser	9.360	390	18.720	780	1,5l pro 1 kg. Wasser
Meerwasserbedarf in kg **pro** prod. **kg H_2**	15.600	650	31.200	1.300	**34,67l pro 1 kg. H_2**

Tabelle 2: Exemplarische Rechnung anhand eines H-TEC Elektrolyseurs.

Quelle: Eigene Berechnungen.

Datengrundlage: spezifische Anforderungen aus dem Datenblatt eines H-TEC Systems PEM-Elektrolyseur (ME450/1400, Quelle: https://www.hannovermesse.de/apollo/hannover_messe_2022/obs/Binary/A1163162/H-TEC-Datenblatt-ME%20450-1400-DE%20%281%29.pdf (zuletzt abgerufen am 14.09.2022). Daten zur Laugenentstehungen aus dem Bericht Entsalzung von Meerwasser https://utopia.de/ratgeber/entsalzung-von-meerwasser-trinkwasser-mit-problemen (zuletzt abgerufen am 14.09.2022)

Inwieweit diese technischen Möglichkeiten umsetzbar sind, ist im Zuge der Erprobungen zu prüfen.

Neben den erwähnten AquaVentus-Großprojekten werden strukturfördernde Unterprojekte angestrebt. Eines davon heißt AquaNavis. Das Vorhaben sieht die Konzipierung verschiedener emissionsfreier Schiffstypen vor, die insbesondere im Hochlauf die eigenen Projekte unterstützen sollen. Es handelt sich um sogenannte Operation & Maintaince (O&M)-Schiffe, welche für die Wartung und Errichtung benötigt werden. Hierzu zählen auch CTVs. Eine Catapult ORE-Studie, eine Abschlussarbeit der TU Delft und eine Fallstudie der Universität Glasgow befassen sich mit der Optimierung maritimer Schiffsversorger-Flotten und geben je nach Größe des Windparks Auskunft über den optimalen Bestand sowie den Bedarf an Schiffstypen und zeigen zudem Möglichkeiten der Emissionsvermeidung auf. Aus den Daten geht hervor, dass die Kosten für die kleinste Schiffsgröße (CTV) relativ hoch sind. Dabei ist dieser Schiffstyp für schnelle Reaktionen auf Fehlermeldungen in Windparks zuständig und verursacht damit einhergehend selbst Emissionen. Dies prädestiniert CTVs dazu, eine der ersten Zielgrößen zur breitflächigen Umstellung auf Brennstoffzellen in der Schifffahrt zu werden, da sie identische Ziel- und Ausgangshäfen haben. Zugleich tritt ein doppelter Effekt ein, denn durch die schnelle Reaktion auf eine Fehlermeldung kann in über 80 % der Fälle mittels mobilen Werkzeugs, ohne Erfordernis größerer Schiffsklassen, die Windturbine wiederinstandgesetzt und grüne Energie einspeist werden (Catapult Offshore Renewable Energy, 01.06.2021; Dalgic, Y. et al., 2014.). Das Konsortium des Hafens von Mukran befasst sich derzeit mit der Allokation von Angebot und Nachfrage des Wasserstoffs, indem die Hafenverwaltung an lokale Charterer oder Reeder von CTVs und kleineren Versorgerschiffen herantritt.

4.4 Cuxhaven, Wasserstoffpotenzial für den Cuxhavener Hafen

In Cuxhaven gibt es eine andere Herangehensweise, indem vor dem Bau eines Elektrolyseurs Abnehmer gesucht wurden. Anders als bei dem zuvor erwähnten RWE-Vorhaben wird in Cuxhaven (vorerst) keine Offshore-Elektrolyse stattfinden, jedoch profitiert der maritime Sektor anderweitig. An Land wird ein 2 MW-Elektrolyseur der Firma FEST (iGas Energy) installiert und soll ab 2023, gespeist aus dem Trinkwasser- und Stromnetz der EWE, täglich 1000 kg H_2 erzeugen. Obwohl der Strom indirekt zum Elektrolyseur über das Stromnetz gelangt, kann der H_2 als grün gewertet werden. Dies führt auf den niedersächsischen Strommix zurück, welcher für Elektrizität bei nahezu 100 % liegt (Land Niedersachsen, 2021, S. 19 ff.). Während zudem eine landseitige Nutzung des H_2, etwa durch eine Tankstelle, vorgesehen ist, wird im ersten Schritt eines von drei Versorgerschiffen der einzigen deutschen Bohrinsel in der Nordsee, der Mittelplate, umgerüstet. Dies gab der Betreiber Dea Wintershall in Zusammenarbeit mit EnTec bekannt (Cuxhavener Nachrichten, 05.05.2022). Durch die günstigen Standortbedingungen am seeschifftiefen Wasser, Hafenanlagen und Infrastrukturen ins Hinterland, können die kurzen Wege mittels LKW genutzt werden, um den H_2 mittels Tanktainern an Bord des Schiffes Coastal Liberty zu kranen. Aktuell befindet sich der Elektrolyseur im Bau, woraufhin im Anschluss das Schiff vom herkömmlichen Dieselantrieb auf Wasserstoff umgerüstet wird, wobei der Dieselantrieb weiterhin als Redundanz-Technologie verbaut bleibt. Der große Vorteil dieser Lösung besteht darin, dass der Elektrolyseur von Beginn an eine signifikante und garantierte Abnahme hat, denn das Schiff verbraucht nach ersten Berechnungen 150 kg pro Fahrt. Dieser in sich geschlossene Kreis bietet Potenzial für weitere Ausbaustufen, um das anvisierte Ziel von bis zu 20 MW Elektrolysekapazität zu erreichen. Das 14 Mio. Euro teure Projekt wird zur Hälfte von Bund und Land getragen. Zur Förderung zählt zudem die Modellregion HyWays for Future, unter Verwaltung des Konsortialführers EWE. Letztere verfügen über Speichermöglichkeiten sowie Kavernen. Zudem hat die EWE die Absicht erklärt, bis 2035 emissionsfrei zu sein. Abgesehen von Elektrolyseuren besitzt die EWE über die gesamte Wertschöpfungskette hindurch Netzinfrastrukturen, Wind- und PV-Parks sowie eine Energie-Trading Agentur.

In Cuxhaven gibt es mehrere Schiffe und maritime Intralogistik, die weitere Abnehmer bedingen können. H_2-betriebene Gabelstapler haben gegenüber einem Batteriebetrieb den Vorteil, dass sie in Bezug auf die Ladezyklen aufgrund kurzer Tankzeiten im Schichtbetrieb ganztägig einsatzbereit sind. Hinzu kommt, dass viele Schiffe Cuxhaven als Heimathafen ansteuern und einen Punktverkehr aufweisen, auch A & A Logistik. Gemeint ist damit, dass sie den identischen Hafen als Anfangs- und Ausgangspunkt haben. Dies begünstigt den weiteren Hochlauf des Wasserstoffs in der maritimen Wirtschaft. Während beispielsweise Containerschiffe auf variablen Routen in jedem Hafen auf eine H_2-Verfügbarkeit angewiesen wären, begünstigen fixe Anlaufpunkte eine Umrüstung zu Wasserstoff. Die Norddeutsche Wasserstoff-Strategie der norddeutschen Küstenländer bekräftigt dieses Vorhaben,

indem auch Schiffe mit Punktverkehr im Zuge der Clean Vehicle Directive Unterstützungen aus der öffentlichen Hand erhalten sollen. Bisher ist dies nur für Straßenfahrzeuge vorgesehen (Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer, 07.11.2019).

Für Cuxhaven bedeutet dies einen potenziellen H_2-Absatzmarkt durch Passagier- und Fahrgastschiffe, Lotsenversetzboote, ein Seebestattungsschiff, Versorgerschiffe und weitere lokale Akteure. Die in Cuxhaven gegründete Deutsche Wasserstoff Liga e.V. adressiert u.a. genau diese Zielgruppe und leistet Aufklärungs- sowie Überzeugungsarbeit. Ähnlich wie im bundesweiten und abgeschlossenen NEW 4.0-Vorhaben soll nicht nur eine Anwendbarkeit demonstriert, sondern auch Akzeptanz geschaffen werden (HAW Hamburg, 18.07.2019). Für „First-Mover" stellt sich die Herausforderung dar, die Aversion neuer Technologien zu durchbrechen und die vergleichsweise höheren Umrüstungskosten zu begründen. Die langfristige Betrachtung sinkender laufender Kosten durch mehr Verfügbarkeit darf dabei nicht vernachlässigt werden. Jedoch zeichnet sich bereits ab, dass künftig nicht alle Schiffe H_2-tauglich sind und umgerüstet werden können. Künftige Schiffsgenerationen werden aufgrund des H_2-Speicherplatzbedarfes breiter und länger ausfallen (DNV-GL, 2019, S. 16 ff.).

Das AquaVentus-Vorhaben, zu dessen Mitgliedern auch die Stadt Cuxhaven gehört, bietet zudem weitere lokale Anknüpfungspunkte der Wasserstoffversorgung und Distribution. Im Falle einer Pipeline von Helgoland zum Festland wirbt die Agentur für Wirtschaftsförderung Cuxhaven mit den idealen Standortvoraussetzungen als Dreh- und Angelpunkt zwischen See- und Binnenverkehr. Sowohl AquaVentus als auch weitere Vorhaben basieren auf grünem Strom durch Windkraft, welche zuvor installiert werden muss. Cuxhaven beheimatet das Deutsche Offshore-Industrie-Zentrum Cuxhaven (DOIZ), welches u.a. die Produktion der Windturbinen durch Siemens Gamesa umfasst. Damit die für 2022 von der Bundesregierung gesteckten Ziele eingehalten werden, muss die Transport-Infrastruktur mitwachsen (WirtschaftsWoche, 27.01.2022). Dies betrifft auch Cuxhaven. Da die Hafenflächen und Kapazitäten voll ausgelastet sind, müssten diese erweitert werden, sodass mit den H_2-Großvorhaben die Logistik und Liegeplätze ausgebaut werden.

Als hilfreich könnte sich zudem das Innovations- und Technologiezentrum (ITZ) für Luft- und Schifffahrt erweisen, welches sich mit H_2-Technologien befassen soll (BMVi, 2021). Während drei andere BMVI-Förderregionen stadtbezogen sind, bildet dies das einzige regionale Cluster ab, bestehend aus Bremen/Bremerhaven, Hamburg und Stade, zu dessen Einzugsgebiet ebenfalls Cuxhaven zählt. Auf Anfrage beim Referat G25 des BMVI wurde mitgeteilt, dass sich das Cluster im Stadium einer Machbarkeitsstudie befindet und noch keine konkreten Aussagen über (Pilot-)Projekte, Arbeitsgemeinschaften oder Unterstützung durch Hersteller getroffen werden könne (Anfrage BMVI, Kontakt Dr. Jens Dietrich. Referat G25). Es wurde auf die verfügbaren Quellen aus e4ships sowie der NOW GmbH verwiesen.

Ein Mitbewerber für die Verortung eines ITZ-Campus ist Hamburg. Die IHK Hamburg möchte durch das ITZ einen Wissenshub im Energie- und Klimahafen Moorburg schaffen (IHK Hamburg, 22.11.2021). Darüber hinaus besteht für Häfen durch die World Ports Climate Initiative (WPCI) die Möglichkeit zur weltweit freiwilligen Partizipation und Verbesserung der Umweltperformance. Umweltfreundliche Schiffe werden im ESI-Index erfasst und können in den Häfen Sonderkonditionen erlangen (BMVBS, 06.2013, S. 52 ff.). Hinzu kommen Netzwerke wie das H_2.N.O.N (Wasserstoffnetzwerk Nordostniedersachsen) und HyWays for Future, die eine Einbindung in anliegende Regionen ermöglichen. Der Elektrolyseur in der Stadt Cuxhaven wird zwar im Vergleich zu den Gigaprojekten nur eine geringe Größe umfassen, jedoch kann sich gerade dies zu einer Vorreiterrolle entwickeln und aufzeigen, wie sich ein selbsttragendes und wirtschaftliches Konzept ergeben kann. Durch Allokation von Angebot und Nachfrage kann das Leuchtturmprojekt durch das Hinzukommen von Akteuren, wie etwa Reeder, zu einem skalierbaren System werden, wodurch Cuxhaven das Potenzial einer Blaupause für weitere See- und Binnenhäfen besitzt. Das von der Agentur für Wirtschaftsförderung verfasste Wasserstoff Konzept (2019) sowie Positionspapier (2020) in Anlehnung an den Elbe-Weser-Raum haben diesen Weg geebnet. Eine H_2-Roadmap soll der nächste Schritt sein (Agentur für Wirtschaftsförderung Cuxhaven, 27.01.2022).

4.5 Norwegen, Erste Wasserstofffähre

Die von Jacob Sterling (Maersk) geforderten allgemein geltenden Emissionszertifikate für Schiffe bleiben zwar bisher aus, doch haben die Länder die Möglichkeit, über die supranationale Rechtsprechung hinaus engere Gesetze zu formulieren, sofern diese nicht gegen das EU-Recht verstoßen. Die norwegische Regie-

rung in Form der Seefahrtsbehörde hat dies zum Anlass genommen, die Durchfahrt emissionsverursachender Schiffe durch Fjorde zu verbieten. Ab 2026 müssen alternative Technologien genutzt werden, damit beispielsweise Kreuzfahrtschiffe vor der Küstenlinie haltmachen. Zugleich hat die Regierung finanzielle Hilfen zur Umrüstung bereitgestellt und das über die Hilfen der IPCEI Fördergelder hinaus. Nachdem dies 2020 angekündigt wurde und ein knapper Zeitraum von fünf Jahren zur Umsetzung zur Verfügung steht, können erste Erfolge verbucht werden. Es fährt bereits eine hybride Fähre, welche derzeit mit Brennstoffzellen ausgestattet wird. Die Auto- und Personenfähre namens Hydra der Reederei Norled AS in Stavanger bietet auf einer Länge von 82 m und einer Breite von 18 m Platz für 80 PKW, 10 LKW und 299 Personen. Es gab mehrere Hürden, die bis zur praktischen Umsetzung bewältigt werden mussten. Hierbei sind die führenden Anbieter für Brennstoffzellen, insbesondere in maritimer Anwendung, BALLARD (FCwave™) sowie der Gas-Spezialist und H_2-Produzent Linde, maßgeblich beteiligt (Norled, 12.2021).

Zur Konstruktion des Schiffs ist zu betonen, dass das Verbauen von wasserstoffführenden Teilen im Innenraum aufgrund der leichten Diffusion problematisch ist. Um diese Regelung zu umgehen, wurden sowohl der Tank mit einer Kapazität von 4 t LH_2 als auch die zwei BALLARD-Brennstoffzellen je 200 kW mit einem Verdampfer, dessen Auslass noch über der Brücke ist, an den höchsten Punkt des Schiffes gesetzt. Dies unterscheidet sich zu herkömmlichen Schiffen mit tiefer gelegenen Tanks. Der Tank ist aufgrund der Verdampfung von LH_2 vakuumisoliert. Zusätzliche Batterien als Redundanztechnologie oder als „Range Extender“ sind im Innenraum verbaut und ermöglichen den bisherigen oder hybriden Betrieb.

In Hinblick auf die Regulatorik hat der Linde-Tank eine DNV-Zertifizierung für BioFuel erhalten, wie LH_2 auch betrachtet werden kann. Bis hierfür konkrete Vorschriften entstehen, wird der Tank in dieser Kategorie betrieben. Für Terminals existiert keine Handlungsanweisung, weshalb man sich dazu entschied, eine mobile Betankung „portunabhängig“ und nicht fest verbaut zu verwenden. An den von Linde aus Deutschland mit LH_2 betankten LKW wird ein mobiler Anhänger mit Verdichter zum Bunkern der Fähre sowie zum Ausgleich des Höhenunterschieds verwendet. Dadurch benötigt der Hafen keine spezielle Zertifizierung. Ein Novum ist die als Trademark eingetragene BALLARD Wave-Brennstoffzelle als Antrieb für Schiffe. Es ist die erste zulässige DNV-Klassifizierung für Brennstoffzellen im Seeverkehr (anstatt Binnenverkehr) und erhielt dadurch eine anerkannte IMO-Nummer (9887530) für das Zero Emission Ship (ZEMS). BALLARD, welche im Jahr 2006 auf Island ein Schiff zu Studienzwecken auf H_2-Betrieb umrüsteten, haben damit einen weiteren Marktvorteil und momentanes Monopol erzielt. Die Gesamtklassifizierung der Fähre ist eine „1A Autofähre mit Batteriebetrieb“ unter norwegischer Flagge (Westcon, 17.08.2021). Die Reichweite durch ausschließlichen LH_2-Betrieb ist nicht öffentlich. Nach der Überführung des neugebauten Schiffs aus dem Mittelmeer wurde es bis Ende 2021 ausschließlich durch Batterie betrieben und befindet sich nun in der Umrüstung. LH_2 wird anfänglich alle drei Wochen durch Linde geliefert. Die risikobasierte IMO Circ. 1455 war eines der wichtigsten regulatorischen Hilfsmittel in der Zulassung, um Fehlerquellen zu minimieren und neue Handlungsanweisungen zu erstellen. Eine dieser Anweisungen ist beispielsweise, dass der Verdampfer nur außerhalb des Personenbetriebs betätigt und abgelassen werden darf, auch wenn H_2 sich nach oben verflüchtigt.

Der weitere Betrieb wird zeigen, ob sich das Modell durchsetzen kann und eine ordnungspolitische Orientierung oder Übertragbarkeit für die IMO (global), die EU-Ausrüstungs- und Sicherheitsrichtlinien (supranational) sowie das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (national) besteht. Die Reederei hat weitere wasserstoffbetriebene Behördenschiffe sowie Offshore-Versorger- und Errichterschiffe in den Klassen CTV, SOV und weitere Offshore Support-Schiffe in Aussicht gestellt sowie einen Zeitplan bis 2035 für die stufenweise Umsetzung benannt. Währenddessen soll eine nationale LH_2-Tankinfrastruktur in Norwegen geschaffen werden, um auf den LKW-Transport aus Deutschland zu verzichten und mehr Kapazitäten vor Ort zu schaffen. Die Umsetzung soll bis 2025 erfolgen, da dann der Abnahmevertrag mit Linde ausläuft (Norled, 12.2021). Je spezieller die Technologie, desto geringer die Verfügbarkeit. Momentan gibt es nur drei Wasserstoffverflüssigungsanlagen in Europa von Air Liquide in Frankreich, Air Products in den Niederlanden sowie Linde in Leuna (Linde, 10.12.2019). Das eingangs erwähnte und strategisch an der Bunkerstruktur der Hydra beteiligte Unternehmen HYON, welches mittlerweile zum norwegischen Elektrolyseur-Hersteller und Global Player Nel ASA gehört, sagt die nachfolgende Entwicklung voraus. Es wird je nach Reichweite und Ausbau der Infrastruktur maritime Nischenlösungen und Anwendbarkeit für H_2, LH_2, NH_3 und ggf. CH3OH (Methanol) neben der Hybridbatterie geben (HYON, 11.02.2022).

4.6 Shetland-Inseln & Orkney, Clean Energy Islands

Orkney und die Shetland-Inseln sind in der Nordsee liegende Inselgruppen mit der Zugehörigkeit zu Schottland, welches wiederum zum Vereinigten Königreich (UK) zählt. Die bereits angeführte „Wind"-Karte verdeutlicht die günstige Lage zur Erzeugung erneuerbarer Energien unter maritimen Bedingungen, während das Einwohner-Land-Gefälle prädestiniert dazu ist, ein Reallabor in Mikrogröße zu etablieren. Diese vergleichsweise kleinen Volkswirtschaften von knapp 23.000 (Shetland) und 22.000 (Orkney) Einwohnern sind aufgrund der Ferne zum Festland und teilautarken Strukturen ideal, um Rückschlüsse auf größere Volkswirtschaften zu ziehen, in diesem Fall im Interesse des UK. Zugleich besteht eine Vernetzung zu anderen Hubs und Netzwerkverbänden in das Ausland, wie etwa nach Hamburg. Auf Orkney wurde 2017 das „Surf'n Turf"-Projekt gestartet, das bis heute aktiv ist (Abb. 6).

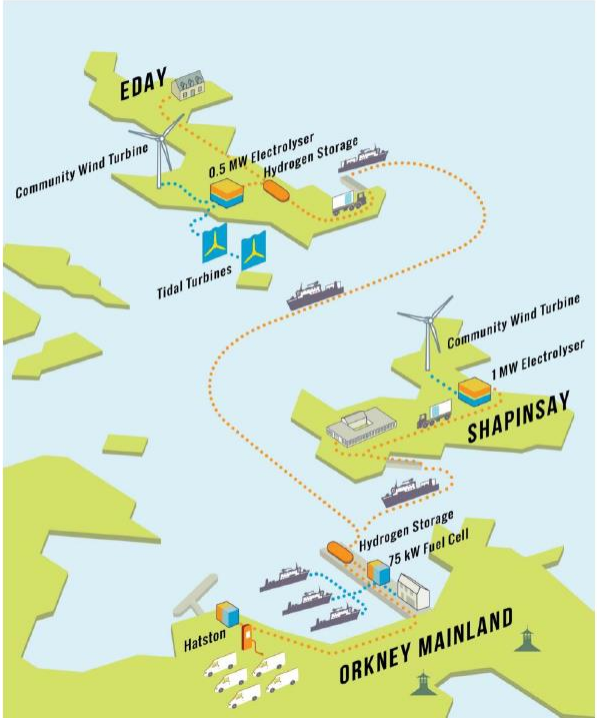


Abb. 6: „Surf'n Turf"-Projekt in Orkney

Quelle: Ferguson Marine, (14.12.2018)

Hierbei wurden erstmals zwei Energieerzeuger zur Elektrizitätseinspeisung verwendet: Gezeitenturbinen und ein Onshore-Windkraftrad. Beide Erzeuger münden mit ihren Kabeln in einem kleinen Containerpark, an dem die Entsalzungs- und Elektrolysemodule stehen. In einem eigens mit Kongsberg konzipierten LKW, in dem mehrere Metallflaschen für Gase fest und quer lagern, wird der H_2 abgefüllt und mittels einer Fähre an die Abnehmer verteilt. Dies ist ein anderer Ansatz als etwa der des Linde LH_2-Tanks (EMEC, 09.03.2018).

Für die Inselbewohner haben Fähren eine immens höhere Bedeutung als für andere Bevölkerungsgruppen, da diese Bestandteile der sozialen Interaktion und des regelmäßigen Austauschs sind, insbesondere in einem Insel-Verbundnetz. Nur mit Fähren oder anderen Schiffen kann man zwischen den Inseln verkehren. Im Jahr 2014 wurde auf Orkney Elektrizität vollumfänglich aus erneuerbaren Energien erzeugt, weshalb seitdem der Fokus darauf liegt, den gesamten Primärenergiebedarf aus grünem Strom und dessen Erzeugnissen zu decken. Avisiert sind sowohl der Wärmesektor als auch Treibstoffe für Landfahrzeuge und Schiffe. Aufgrund dessen bemängelt der Island Council, dass es keine ausgereifte kohlenstoffarme Antriebstechnologie gibt (Stand 2014) (EMEC, 04.05.2022). Derzeit stoßen die neun lokalen Fähren jeden Tag Emissionen aus. Nachdem durch europäische Kooperationsgemeinschaften mit HySeas I und II grundsätzliche Integrierbarkeiten nachgewiesen wurden, um Schiffe umzurüsten, sollte das Projekt HySeas III eine von Grund auf neukonzipierte Fähre mit Wasserstoffantrieb sein (H2-international, 01.2019, S. 42 ff.). Die Fähre hätte ab 2021 zwischen Shapinsay und Kirkwall verkehren sollen, doch noch immer ist das Schiff aufgrund von HAZID-Prozessen, Planung und bürokratischen Hürden nicht fertiggestellt. Dabei startete das Projekt zeitlich vor der norwegischen Fähre und namhafte Wasserstoffakteure wie McPhy und BALLARD sowie das DLR sind involviert (Scottish Enterprise, 08.2021, S. 27 ff.). Aus dem Leitfilm zum Projekt sowie der technischen Zeichnung geht hervor, dass nach aktuellem Stand keine Anbringung des H_2-Gastanks auf dem Oberdeck geplant ist, wie etwa bei der norwegischen Fähre, sondern dieser herkömmlich verstaut werden soll. Der aus Norwegen stammende Antriebsstrang der HySeas III durchläuft derzeit Tests. Es ist zu erkennen, dass ein auf Orkney getestetes Transportsystem mehrerer lagernder Flaschen für das Schiff übernommen werden soll, als eine Art kranbarer und rollbarer Minicontainer mit liegend-gepackten H_2-Gasflaschen (Kongsberg, 24.12.2021)[4]

[4] Anmerkung: Ein solches System wurde 2022 in Deutschland im Zuge der BEHALA Elektra verbaut. Es ist ein hybrid-betriebenes Binnenschubboot für Bargen und beinhaltet ebenfalls eine Lösung stehender H_2-Gasflaschen, nebst Batterie. Dadurch, dass die Module

Obwohl das Surf'n Turf-Vorhaben innovative Technologien wie die unter Wasser befindlichen und von den Strömungen abhängenden Turbinen demonstriert, machen diese im Vergleich zur Windkraft nur einen geringen Teil der lokalen Energieversorgung aus. Gleichermaßen existieren auf den Shetland-Inseln Gezeitenturbinen des Unternehmens Nova, welches auf jährlich steigende Wachstumsraten im Ausbau verweist (ORION Clean Energy Project, 04.05.2022). Das in Schottland ansässige European Marine Energy Centre (EMEC) hat neben den aktuellen Projekten ebenfalls eine langfristige Vision, sowohl für Shetland-, als auch Orkney-Inseln. Im Fall von Shetland möchte das Orion Clean Energy Project die weltführende Klimainsel aus regenerativen Energien werden. Neben einem ausgeprägten Netzwerk, einem Portfolio aus On- und Offshore-Windkraftanlagen, Gezeitenturbinen einer geographisch günstigen Lage, potenziellen Abnehmern durch diverse Fähren, Schiffe und einem perspektivischen Ausblick mit der Rolle als H_2-Exporteur, haben die Inseln und Schottland im Allgemeinen einen weiteren Vorteil, die Öl- und Erdgasindustrie.

4.7 Schottland, Europäischer Wasserstoffexport

Schottland und das UK verfügen über ausgeprägte Gas- und Ölinfrastrukturen an Land und zu See. Die bestehenden Infrastrukturen sollen Teil der Reformierung und Dekarbonisierung des Energiemarkts werden, indem fossile Energieträger weitestgehend durch Innovation und gezielte Dekarbonisierung von Öl und Gas (engl. INTOG) gewonnen werden sollen (Scottish Government, 09.11.2021, S. 10 ff.). Dieser Kompromiss eines emissionsarmen Schöpfens fossiler Rohstoffe soll mittel- bis langfristig zur Transition beitragen. Bestehende im Wasser befindliche Pipelineinfrastrukturen sollen „retrofitted", also instandgesetzt oder erneuert werden und ggf. eine anteilige Einspeisung des Wasserstoffs beinhalten, wie es derzeit in den Niederlanden erprobt wird. Des Weiteren bestehen Pfadabhängigkeiten im Aufbau von Offshore-Strukturen. Auch wenn Wasserstoff Unterschiede zu anderen Gasen aufweist, werden grundsätzliche Prozesse und Handlungsabläufe identisch bleiben, sodass Fachpersonal umgeschult werden kann. Die Vorstufe zur Errichtung der Offshore-Elektrolyse ist durch die Vielzahl existierender Windkraftanlagen und Plattformen im Meer, ebenso wie Floating, gegeben. Nachdem die Technologie zur Verfügung steht, wird durch die International Energy Agency (IEA) sowie die schottische Regierung (scot.gov) eine schnellere Umsetzbarkeit prognostiziert (IEA, 17.05.2021, S. 180 ff.).

Neben der Vielzahl an maritimen Technologien für Windkraft investieren die britische und schottische Regierung intensiv in den Ausbau erneuerbarer Energien. Dabei sind deutsche Unternehmen wie die Energie Baden-Württemberg am schottischen Markt vertreten. Das jüngst abgehaltene ScotWind-Vergabeverfahren über die Erschließungs- und Nutzungsrechte schottischer Seebett-Areale ist ein weiteres Novum. Die Auktion mit über 25 GW an neugeschaffener Kapazität ist das größte Vorhaben erneuerbarer Energien im geographischen Europa. Hinzu kommt ein weiteres Projekt von Vattenfall, welches immense Folgen für die Umsetzung und Machbarkeit der Offshore-Elektrolyse hätte. Es steht im Wettbewerb zu dem in Mukran abgehaltenen RWE-Projekt sowie dem niederländischen Pendant H2opZee. In dem Vattenfall-HT1-Projekt werden bis zu sieben 40 ft. Container mit Offshore-Elektrolyseequipment auf der Operationsplattform einer existierenden 1 MW Monopile-Windturbine angebracht. Hierzu wird ebenfalls eine Erweiterung der Plattform benötigt. Doch anders als bei anderen Projekten soll der Wasserstoff durch eine unter Wasser schwimmende Pipeline, eine sog. FlowLine, transportiert werden. Die fünf Routenoptionen der Studie planen dabei die Überwindung einer Distanz von 6 bis zu 15 km vor. Die abweichenden Distanzen resultieren aufgrund sensibler maritimer Habitate und Böden. Es wurden für das Verlegen der FlowLine, für die Erweiterung der Plattform sowie zum Ablassen des Sauerstoffs und Salzwassers nach der Elektrolyse bzw. der Entsalzung mehrere Lizenzen beantragt. Trotz voriger HAZID-Analysen in Bezug auf Handling, Transport oder Behinderung der Seefahrt wurde die veränderte Unterwasserwelt aufgrund des Ablassens des Salzwassers als sensitives Risiko angeführt (RSK, Vattenfall, 11.2021).

Da die Voruntersuchungen abgeschlossen sind, soll nach Erteilung der Lizenzen alsbald gestartet werden. Eine strategische Umweltuntersuchung (engl. Strategic Environmental Assessment of the Draft) ist für jedes Offshore-Vorhaben verpflichtend und wurde in Bezug auf die aufkommenden Wasserstoffvorhaben

auf das Oberdeck gekrant werden und eine mobile Ladeinfrastruktur gesetzt wird, kann vorerst die Thematik der H_2-Betankungsterminals umgangen werden. Das zwischen Berlin und Hamburg verkehrende Schiff ist ausschließlich für die Binnenschifffahrt zugelassen und befindet sich momentan im Testbetrieb. Das NOW betreute und mit 14 Millionen Euro geförderte Projekt durch das BMVI befasst sich zudem mit weiteren Pilotprojekten, wie der Digitalisierung der Schifffahrt sowie neuer Antriebssysteme.

durchgeführt. Der „Strategic environmental assessment Hydrogen Action Plan for Scotland“ wurde im Auftrag der schottischen Regierung erstellt (Scottish Government, 12.2020). Enthalten sind die Qualität von Wasser, Boden (Erde), Luft sowie der Einfluss auf Geräusche, Biodiversität (Flora & Fauna), temperaturverändernde Faktoren, Kulturgüter, Landschaft sowie Verkehr. Ein Draft wurde für jede einzelne Region an Land und zu Wasser erstellt. Grundsätzlich kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass in umgewidmeten Gebieten aus der Öl- oder Erdgasförderung mit einer Erholung der Natur zu rechnen ist. Zugleich wird in der Studie der zu befürwortende Wasserstoff-Ansatz erwähnt (Scottish Government, 11.2021, S. 44 ff.). Zudem ist die Studie technologieoffen, da keine Differenzierung zwischen der Erzeugung von H_2 aus regenerativen Energien (dt. Kompass grün) oder gering verursachenden Emissionen stattfindet (dt. Kompass blau und ggf. grau). Im Zuge der Transition ist eine grau/blaue Erzeugung aus Erdgas folglich nicht ausgeschlossen (Scottish Government, 11.2021, S. 81 ff.). Ab 2023 wird ERM mit dem Dolphyn Offshore-Elektrolyse-Projekt hinzukommen und ein ähnliches Konzept verfolgen, jedoch in 10-facher Größe (10 MW), welches ebenfalls wie HT1 bei Aberdeen liegt.

Es existiert sowohl seitens des UK als auch von Schottland ein Pendant zur NWS. In Bezug auf die ScotWind Awards und die 17 Projekte mit einem Gesamtcharakter von 25 GW sind die Ziele einvernehmlich mit dem „Scottish Draft Hydrogen Action Plan“. Der Plan umfasst wichtige Wegpunkte einer Wasserstoffökonomie von 2020 bis 2035. Auffallend ist, dass im Sommer 2022 ein Konsortium ins Leben gerufen wird, welches sich mit dem Transport von H_2, insbesondere mit dem Export, befasst (Scottish Government, 09.11.2021, S. 14 ff.). Im weiteren Verlauf wurde betont, dass ab 2024 der erste H_2 nach Deutschland exportiert werden soll, womit dem Gremium zwei Jahre für die Realisierbarkeit bleiben (vgl. Abb. 7).

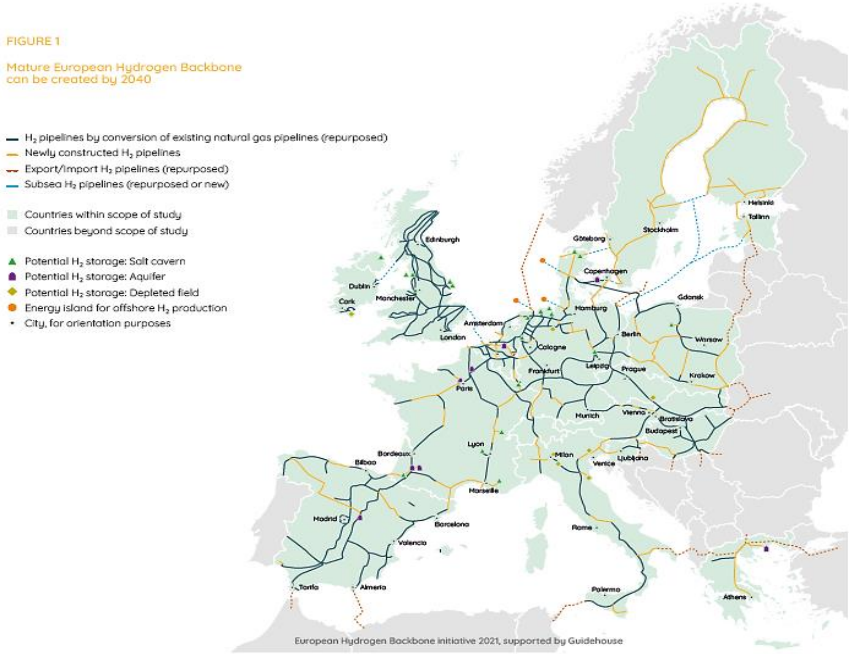


Abb. 7: Planung eines H_2-Netzes in Europa

Quelle: Guidehouse, (04.2020), S. 12

Angesichts der zuvor beschriebenen Transportproblematik sowie der relativ langen Zeiträume der Legitimierung und technischen Umsetzung eines jeden Szenarios (Pipeline und Schiff) erscheint dieses Ziel wenig realistisch. Die derzeit einzig denkbare Nische sind aufgrund der Transportinfrastruktur die Tanktainer. Schiffe mit Leerkapazitäten könnten ausgelastet werden und selbst nach einholender Technologie und skalierbaren Derivats-Mengen sind die Tanktainer für eine Intra- und Binnenlogistik im Schienen-, Straßen- und Binnenverkehr weiterhin einsetzbar (Landesagentur Hessen, 30.06.2020). Zugleich würde man erste Abnehmer gewinnen und einen weiteren Schritt in Richtung Transition gehen. Absehbar ist, dass aufgrund der Stahlmenge und -preise hohe Kosten entstehen. Außerdem verbleibt die Frage, wie ein globaler H_2-Handel die Länder verknüpfen kann.

5. Perspektive: Globaler Wasserstoffhandel

Die Komplexität des sich anbahnenden globalen Wasserstoffhandels ist enorm. Anhand der Projekte lässt sich jedoch ableiten, dass es zwei Haupttreiber für die technologische Entwicklung gibt: Preis und Verfügbarkeit. A.P. Moeller Maersk geht einen solchen Schritt in Richtung globalem Wasserstoffhandel mit der Bestellung der zwölf Methanol betriebenen Schiffe von Mitsubishi Heavy Industries. Zugleich sind mit weiteren Anbietern Abnahmeverträge über die Selbstversorgung hinaus ab dem Jahr 2025 getroffen worden (Maersk, 10.03.2022). Der Vorteil des Methanols mit 16 MJ per Liter ist, dass dieser am ehesten an den aktuell verfügbaren Kraftstoff wie LNG (21-24 MJ) herankommt. Während LNG kryogen bei -162°C transportiert wird, ist bei Methanol ein Transport unter atmosphärischen Bedingungen möglich.[5] Die Entscheidung von Maersk überrascht, da aufgrund fester Vergleichsgrößen anfängliche Tendenzen in Richtung Ammoniak liefen,. Durch Nitrate und andere Formen des Ammoniaks in der Wirtschaft gibt es Richtwerte, an denen sich Preis und Markt orientieren. Abgesehen vom Bedarf für Medizinprodukte existiert ein Methanol-Markt bislang nicht. Aufgrund fehlender Vergleichspreise wurde NH_3, trotz Risiken im Handling, befürwortet. Durch die Bestellung und eine erste Tendenz in der Schaffung der Infrastrukturen durch Maersk können weitere Marktteilnehmer in diesen Markt eintreten.

Derzeit finden aufgrund des unklaren Ausgangs Versuche zum Transport des H_2 in anderen Formen statt. Im Zuge der Machbarkeit wird in Australien Wasserstoff aus Braunkohle hergestellt, verflüssigt und mittels eines dafür konzipierten neuen LH_2-Schiffs nach Japan verschifft. Der mit Diesel betriebene LH_2-Carrier namens Suiso Frontier gibt zudem den LH_2 an ein in Kobe konzipiertes LH_2-Importterminal ab und fährt daraufhin mit einer Leerfahrt zurück nach Australien (Siehe Tabelle A 1 für eine Auswahl aktueller Wasserstoff-Schiffe und Projekte). Weitere Hersteller wie GTT produzieren weiterhin LNG-Schiffe, da diese zur Transition beitragen und erste Veränderungen bezüglich der künftigen Nachfrage abgewartet werden (GTT, Präsentation, 09.03.2022). Aufgrund des Russland-Ukraine-Kriegs und des dringenden Bedarfs an Energieressourcen sind in Deutschland derzeit vier schwimmende LNG-Terminals, nebst fest integrierten, im Gespräch. Während in der vergangenen Wahlperiode eine LNG-Gegenkampagne vorherrschte, hat sich die Lage geändert, wodurch Wirtschaftsminister Robert Habeck LNG- und Wasserstoff-Abnahmeverträge in den VAE und Katar schloss. Über die Höhe des Imports ist nichts bekannt, doch werden die Mengen nicht für den Energiemarkt, wie Heizkraftwerke, ausreichen, da hierfür immense und dauerhafte Lieferungen nötig wären.

Weitere Länder wollen aufgrund ihrer geographisch günstigen Lage, durch Wind- oder Sonnenenergie, H_2 produzieren und exportieren. Insbesondere die Länder Australien, Chile und Marokko werden neben den arabischen Ländern angeführt. Erneut kommt hier das „Henne-Ei-Problem“ zum Tragen, sodass ein First-Mover benötigt wird. Dieser wird jedoch erst mit der Verfügbarkeit der Transportmittel auftreten. Während Schiffe zwar aufgrund beschleunigter Zulassungsverfahren relativ schneller als Pipelines gebaut werden können, spielt hier auch die Transportdistanz eine entscheidende Rolle. Aus europäischer Sicht ist es von daher verständlich, dass eine Pipeline aus Marokko mehr Sinn ergäbe als aus Chile. Gleiches gilt umgekehrt für Schiffe, in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit (Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik, im Auftrag des DMZ, 09.11.2021).

Ein europäisches Importterminal ist in Planung, das ein riesiges Pipelinesystem speisen soll und durch nahezu

[5] Tabelle A2 im Anhang visualisiert die gängigen H_2-Derivate, die fossile Brennstoffe ersetzen könnten. Insbesondere die volumetrischen Energiedichten im Vergleich zu einem herkömmlichen Marinediesel-Tank, welcher hier als Benchmark mit der Größe Eins festgesetzt wurde, ist von Bedeutung. Erste Tendenzen in Richtung Ammoniak entstanden aufgrund eines LNG-Markts, in dem Transport, Handling und Nachfrage eingeschätzt werden konnten. Doch während in dieser Tabelle auf Grundlage der IRENA-Studie der LNG-Tank das 2,88-fache eines herkömmlichen Tanks benötigen würde, ist dies für Methanol lediglich das 2,32-fache. Bisher wurden keine großen Mengen Methanol gehandelt, respektive Schiffe betrieben oder Mengen in vergleichbaren Größen zu einem LNG-Tank transportiert.
Die Vor- und Nachteile des Methanol-Netzes werden im weiteren Verlauf der Arbeit diskutiert. Zudem lässt sich eine weitere Annahme aus dieser Darstellung ableiten. Es werden drei verschiedene Schiffstypen, die sich von kleineren Größen der CTVs bis zu Containerschiffen steigern, adressiert. Das Fazit ist, dass im Zuge der Wasserstoffstrategie größere H_2-Abnahmen benötigt werden, als derzeit durch Wasserstoffautos abgenommen werden. Um Anreize für Investoren zu schaffen, weitere Elektrolyseuranlagen zu realisieren, würde die Schifffahrt eine solche Abnahmegröße darstellen. Während sich Synergieeffekte durch eine hohe Auslastung der Elektrolyseure auf den „Tankpreis“ der H_2-Fahrzeuge auswirken könnten, würden erste kleinere Schiffe als MGO-Emittenten vom Markt austreten. Eine CTV-Betankung entspricht 176 Fahrzeugbetankungen, was knapp ein Zwölftel aller zugelassenen H_2-Pkws in Deutschland darstellt. Nach dieser Ausbaustufe und der Etablierung einer nächstgrößeren Schiffsklasse, wie etwa der OSVs, entspräche dies 4.880 PKW-Betankungen (bzw. 28 CTVs). Die Angaben über die Tankgrößen der Schiffe sind lediglich eine theoretische Annäherung. Echtgrößen würden aufgrund Mehrkammersysteme und z.T. der Ausdehnung je Volumina größer ausfallen.

alle kerneuropäischen Länder führt, der sogenannte European Hydrogen Backbone (Der Nationale Wasserstoffrat, 16.07.2021, S. 1 ff.). Deutsche Netzbetreiber, sowie Akteure zur Speicherung und Weiterverteilung, haben sich im Rahmen des Projekts Clean Hydrogen Coastline zusammengefunden und übernehmen die Verwaltung des deutschen H_2-Gasnetzes (EWE et al., 24.03.2021). Der beispielsweise in Ammoniak transportierte Wasserstoff soll dafür im Zielhafen aufgespalten und ins Gasnetz eingeleitet werden. Momentan wird Rotterdam als wahrscheinlichster Zielhafen gehandelt. Da nicht nur in Deutschland ein Nachfrageüberschuss besteht, wird es neue Marktordnungsinstrumente geben müssen, um Importe zu verteilen. Die Hydrogen Intermediary Company (HINT.CO) hat im Auftrag von H2Global ein Bietersystem entworfen, indem durch Differenzverträge (CfD) ein kompetitives Bietersystem für die Anbieter- und Abnehmerseite entsteht. Die Abnahmeverträge sollen mittel- bis langfristige Gültigkeit haben, damit die Anbieter die Risiken der Etablierungs- und Investitionskosten dieser neuen Technologien minimieren und eine garantierte Abnahme kalkulieren können. In diesem Modell ist ein Kompensationsmechanismus enthalten, falls der Etablierungspreis durch die Entwicklung sinkt. Durch dieses Finanzierungssystem sollen zudem Nicht-EU-Länder finanzielle Unterstützung im Aufbau der H_2-Infrastrukturen erhalten, wenn diese als Distributor agieren. Die Europäische Kommission hat dieses System bereits befürwortet. Das Geld, welches aus den Corona-Aufbau-Fonds verwendet werden soll, berücksichtigt Nicht-EU-Länder, wobei die Mittelverwendung durch die Mittelgeber gesteuert wird (HINT.CO, Präsentation, 04.2022).

Der digitale Energieanbieter E-Bridge hat derweil einen Wasserstoff-Preisindex erstellt, der wie andere Score-Formeln (etwa SCHUFA o.ä.) geheim ist. Da es jedoch noch keinen tatsächlichen Wasserstoffmarkt mit physischen Marktplätzen gibt, ist die Formel vielmehr ein theoretisches Rechenspiel, indem kurzfristige Gas-, Strom-, und Zertifikat-Spotpreise nach Verfügbarkeit gegenübergestellt werden. Anhand der verfügbaren Kapazitäten und jeweiligen Preise werden anschließend die Gestehungskosten für grünen, blauen und grauen H_2 theoretisch berechnet. Nicht enthalten sind hier die Kapitalkosten, welche, wie bereits erwähnt, insbesondere für diese neuen Technologien hoch sind und stark variieren, sodass nur eine bedingte Vergleichbarkeit gegeben ist (E-Bridge, 19.05.2022). Zugleich kann man festhalten, dass andere Prognosen für den europäischen Markt, welche vor dem Februar 2022 verfasst wurden, keine Aussagekraft mehr haben. Ein Beispiel hierzu ist die McKinsey-Studie aus 2021 im Auftrag des Hydrogen Council. Wenn man den Hydex als Orientierung verwendet, besteht aktuell das prognostizierte Preisniveau, welches erst 2027-2028 in Deutschland erreicht worden wäre. Durch den Russland-Ukraine-Krieg und die massive Verteuerung der Energieressourcen gab es eine sprunghafte Zäsur, dessen oberes Ende bisher noch nicht absehbar ist. Während pro Jahr weniger Zertifikate ausgeteilt worden wären und eine Verjüngung des fossilen Energiemarkts eine Preissteigerung zur Folge gehabt hätte, sind nun Alternativtechnologien sprunghaft preiswerter geworden, was die Markttransformation beschleunigen könnte. Abgesehen von den ebenfalls gestiegenen CAPEX entspricht die aktuelle Preisentwicklung in Anlehnung an das McKinsey-Modell den prognostizierten OPEX der Wasserstofftechnologie in sechs Jahren (siehe Abb. 8 in der Infobox).

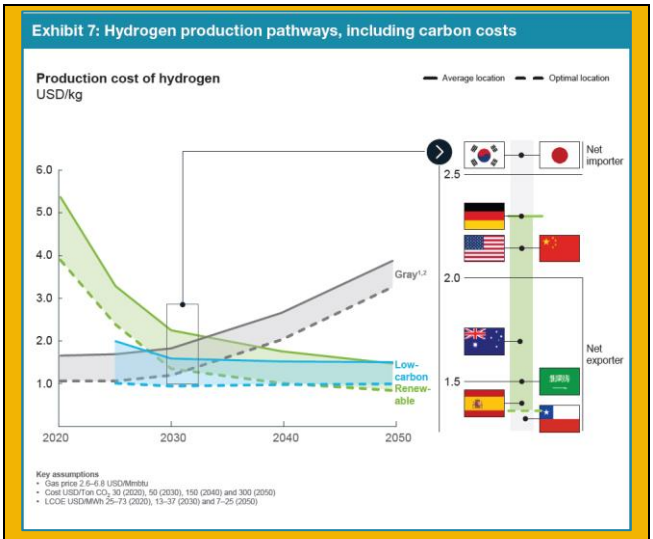


Abb. 8: Künftige Produktionskosten von Wasserstoff

Quelle: McKinsey, FCH Europe, (01.2019), S. 13

Die aus 2019 stammende Grafik ist durch den Russland-Ukraine Krieg und den Anstieg der Energiepreise schneller vorangeschritten, als zuvor angenommen. Der graue Wasserstoffpreis aus Erdgas und somit auch der blaue Wasserstoffpreis sind schneller gestiegen als der grüne Wasserstoffpreis. Dies hat zur Folge, dass der grüne Wasserstoffpreis relativ günstiger ist und sich die blaue und graue Kurve nach oben verschoben haben. Ceteris paribus verschiebt sich das Gleichgewicht nach links oben. Eine relativ günstigere Produktion von grünem Wasserstoff tritt früher ein als angenommen. Momentan (Mai 2022) befindet sich das Kostenniveau auf der Höhe, welches erst für 2027 bis 2028 prognostiziert wurde.

6. Fazit

In Europa werden 77 % des Außenhandels über den Seeverkehr und die Häfen abgewickelt. Die Anzahl aller weltweit im Seeverkehr eingesetzten Schiffe, die einen Stopp in europäischen Häfen einlegen, liegt zudem bei 80 % (EEA, 19.01.2022). Infolgedessen hätte eine Ausweitung des EU-ETS auf die Schifffahrt eine signifikante Auswirkung, auch für außereuropäische Häfen. 99 % des weltweiten Energiebedarfs von Schiffen sind fossilen Ursprungs (IRENA, 2021, S. 89 ff.). Visionäre Vorhaben wie von AquaVentus oder ein Hydrogen Backbone Europe samt Sektorenkopplung sind erstrebenswert. Jedoch scheint, dass die Vielzahl der zur Verfügung stehenden H_2-Derivate die Projekte verlangsamt. Dies führt dazu, dass Unternehmen als „First-Mover" eigene Wege gehen und seitens der Politik allgemeine Förderungen für emissionsfreie Technologie bestehen. Marktakteure wie Reeder und Investoren tragen dabei die Risiken. Der momentane Fokus sollte daher auf dem Ausbau geeigneter Transport-Infrastrukturen liegen, wobei mittelfristig LNG-Terminals eine realistische Lösung darstellen. Wie durch eine Machbarkeitsstudie über die „Perspektiven geplanter Terminalinfrastruktur für eine zukünftige Energieversorgung im norddeutschen Raum"[6] belegt, ist eine Nutzbarkeit über das LNG hinaus, hin zum Wasserstoff, möglich.

Aktuelle Entwicklungen sehen die Anlandung mittels Schiffe über Rotterdam als europäischen Importhafen für H_2 und dessen Derivate in den Hydrogen Backbone vor. Aus deutscher Sicht gibt es mehrere Gründe, warum eigene bedarfsgerechte Importinfra- und Suprastrukturen sinnvoll sind. Nicht nur, dass der Transportweg in nördliche Länder verkürzt ist, auch die eigenständige Anbindung an potenzielle europäische Exportländer, wie an das UK (Schottland) sowie das Potenzial Islands sind als Gründe anzuführen. Hinzu kommen die nutzbaren Seeflächen laut der Raumnutzungspläne der deutschen Seeküste und das AquaVentus Giga-Projekt. Selbst wenn dies zeitlich später als avisiert zum Tragen kommt, wäre mit dem Erreichen der Küstenlinie eine Infrastruktur durch Importterminals ins Hinterland geschaffen.

Zum jetzigen Zeitpunkt von einer Sektorenkopplung zu sprechen scheint verfrüht, da Kraftwerke dauerhaft große Mengen Wasserstoff benötigen. Selbst wenn sich beispielsweise ein Stahlunternehmen dazu entschließt, einen eigenen Elektrolyseur zu errichten, macht dieser nur einen Bruchteil der benötigten Energie aus, da im Hintergrund gewaltige Wind- oder Sonnenkapazitäten benötigt werden. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, Zielgruppen einzugrenzen, etwa nach Abnahmemengen oder Höhe der Emissionsverursachung. Das durch H2Global errichtete CfD-Vergabeverfahren könnte diese Möglichkeit in Betracht ziehen und vorerst nur für die Schifffahrt oder den Flugverkehr öffnen. Die Vergabe würde zudem als Fördermechanismus fungieren und die technologische Entwicklung beschleunigen. Nachdem ein erster Markt erfolgreich umgestellt und zugleich weitere H_2-Kapazitäten errichtet wurden, könnte der Markt um eine nächste Zielgruppe erweitert werden.In diesem Kontext ist interessant, dass das Potenzial von Tanktainern für H_2 keine Erwähnung findet, wobei Tanktainer „offen" (Verflüchtigung von H_2) in der Infrastruktur aufgeladen und mit den gängigen Transportmitteln (außer per Luftfracht) bewegt werden können. Natürlich wäre ein Transport mit mittels Marinegas betriebenen Schiffen keine rein grüne Transition, jedoch beträgt die Nutzungsdauer von Schiffen 20 bis 25 Jahre. Auf regelmäßigen Routen des Linienverkehrs könnte hier eine maximale Auslastung der Schiffe erfolgen, mit der Folge, dass der CO_2-Fußabdruck je transportiertem Container anteilig sinke. Zugleich würde die Effizienz steigen und am Zielort für eine Verdrängung fossiler Treibstoffe sorgen. Hinzu kommt die weitere Anwendungsmöglichkeit in der Intralogistik. Aus diesem Grund erscheint das erfolgversprechende Potenzial der Tanktainer bisher nicht ausreichend in Studien betrachtet.

Die momentane Verfügbarkeit des Wasserstoffs ist sehr begrenzt und trotz des Ausbaus der Kapazitäten wird die Nachfrage steigen. Eine Handvoll deutscher Städte entwirft daher eigene H_2-Strategien, eine Entwicklung, die auch in weiteren europäischen Hubs zu sehen ist. Dennoch muss verdeutlicht werden, dass es eine Herausforderung darstellt, als First-Mover zu agieren und Investitionen in dem H_2-Sektor zu tätigen. Derzeit gibt es eine Vielzahl an Studien, die sich im Hinblick auf den prognostizierten Gesamtbedarf oder des künftig dominierenden H_2-Derivats widersprechen. Dabei werden die realisierten Projekte über den Erfolg entscheiden.

Die Energiewende ist nicht nur ein Wettbewerb der Innovationen, sondern zugleich auch der Informationen. Während manche Akteure den bestmöglichen Zeit-

[6] Windkraft-Journal (26.08.2021). TU Hamburg untersucht Aufbau einer Infrastruktur für eine zukünftige klimaneutrale Energieversorgung, in: https://www.windkraft-journal.de/2021/08/26/tu-hamburg-untersucht-aufbau-einer-infrastruktur-fuer-eine-zukuenftige-klimaneutrale-energieversorgung/165705 (zuletzt abgerufen am 12.05.2022).

punkt von Fördermitteln abpassen oder auch die Ausgaben in F&E Dritten überlassen, wird nur wenig Wissen geteilt. Insbesondere mit der Spezialisierung auf die maritime Wirtschaft und den engen Kreis der Akteure divergiert dies nach den Aussagen der NWS oder EU Hydrogen Roadmap. Dort wird von einem Wissens- sowie Technologietransfer berichtet. Solche Tendenzen werfen Fragen auch hinsichtlich frühestmöglicher Lieferungen des ohnehin ambitionierten Zeitplans verschiedener Wasserstoffstrategien auf. Hinzu kommt eine gestiegene Risikoaversion vieler Unternehmen durch die Corona-Pandemie und den Russland-Ukraine-Krieg. Dabei ist jetzt der Zeitpunkt, an dem der erneuerbare Sektor den bestmöglichen Aufschwung erhält und außerdem fossile Preise steigen.

Diese Entwicklungen befürworten die eigenständigen und vergleichsweise kleineren Projekte, wie in Aberdeen, Cuxhaven oder Hjelmeland (Norwegen). In einem ersten Schritt wird ein lokales Abnehmer-Produzenten Verhältnis geschaffen. Gleichzeitig ordnet man sich realistisch ein, da momentan weltweit (ohne Asien) rund 500 MW an Wasserstoffgesamtkapazität zur Verfügung stehen (Carneades Hydrogen, 28.04.2022). Global sind dieser Größe mehrere auf dem Meer befindliche zweistellige Giga-Projekte bis 2035 gegenübergestellt, wobei es momentan nur eine 1 MW Offshore-Elektrolyse vor der niederländischen Küste im Testbetrieb gibt. Dabei wurde dieses Jahr (Stand Mai 2022) in Deutschland keine weitere Offshore-Windkraftanlage errichtet. Da in den norddeutschen Ländern die EEG-Förderungen bis 2025 auslaufen, können Windkraftanlagen anderweitig genutzt werden (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2021, S. 6 ff.). In Anbetracht von Abschaltungen zu Hochphasen stellt Wasserstoffelektrolyse eine effiziente Nutzung der Speicherung dar, um Wasserstoff in Dunkelflauten abzurufen.

Damit die Regierung, wie vom DMZ gefordert, schnell und entschlossen agieren kann, müssen Zielgruppen ausfindig gemacht werden. Die Gruppe von Abnehmern sollte dabei mit jedem hinzukommenden Akteur weder zu klein (PKW) noch zu groß sein (Kraftwerke). Mit dem NIP-Projekt e4ships ist der erste Schritt für maritime Hubs, Infrastrukturkonzepte sowie F&E geschaffen. Strategisch zeichnen sich Häfen durch ihre Standortvorteile in der Erzeugung und Weiterverarbeitung aus. Darüber hinaus sind die Standorte begünstigt, an denen Schiffe wie CTVs ihren Start- und Zielhafen haben, indem nur eine Betankungsstruktur und H_2-Produktionsstätte im Vergleich zum Linienverkehr erforderlich sind. Zugleich wird dieser maritime Sektor schrittweise dekarbonisiert und eine Etablierung sowie Übertragbarkeit auf weitere Häfen, auch ins Ausland, besteht.

Das Cuxhavener Modell einer integrierten maritimen Wasserstoffwirtschaft birgt somit das Potenzial, als Blaupause für weitere Häfen zu fungieren. Indem sich weitere Häfen anschließen und dem Modell folgen, können gemäß der Annahme von HYON größere Schiffsklassen umgerüstet und längere Distanzen überwunden werden. Auf diese Weise wächst die Regulatorik mit. Der Vorfall auf dem Kawasaki LH_2-Carrier zeigt, dass der Grat zwischen dem Entwicklungsdruck und sicherem Handling schmal ist. Während die Erwartungshaltung auf der einen Seite sehr hoch ist, bedeutet jeder weitere Vorfall Verschärfungen und Verzögerung in den Zertifizierungsprozessen, welche die gesellschaftliche Akzeptanz gefährden. Der DNV-GL prognostiziert selbst Lerneffekte aufgrund unvermeidbarer Unfälle, trotz voriger HAZIDs. Dies beruhe darauf, dass momentan eine geringe Quantität von Anwendungen vorläge (DNV, 06.2021, S. 34 ff.).

Laut dem Fraunhofer-Institut werden sich in der Schifffahrt Flüssigkraftstoffe durchsetzen. Dies ist auf die höhere Energiedichte bei einem geringeren Volumen als im gasförmigen Zustand, zurückzuführen (Fraunhofer, 10.2019, S. 32 f.). Es ist unstrittig, dass der Wasserstoffmarkt wachsen wird und sich der maritime Sektor wandelt. Die momentane Preisentwicklung fossiler Brennstoffe beschleunigt dies ohne regulatorisches Eingreifen, wie man auch anhand der Methanol-Flotte von Maersk und der Hydra (Norwegen) deuten kann. Insbesondere die weiteren Sektoren um Windkraft, Solar und Infrastruktur (Pipelines) werden einen Aufschwung und erhöhten Bedarf an Stahl und Edelmetallen erfahren. Die maritime Wirtschaft eignet sich somit als Zielgröße, um den Wasserstoffmarkt schrittweise auszubauen.

Übergreifend zeigt diese Studie die erheblichen regulatorischen und innovatorischen Anstrengungen, die bereits unternommen wurden, um der Realisierung einer Wasserstoffwirtschaft näher zu kommen. Ebenso zeigt sich die Komplexität der Zielsetzungen und die technischen Herausforderungen, die einer kurzfristigen Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft entgegenstehen. Ebenfalls zeigt sich deutlich die grundlegende Relevanz des Wasserstoffhandels und der globalen Dimension der Wasserstoffproduktion, um Energie-Versorgungssicherheit in Deutschland über Wasserstoff zu erreichen. Dem Mittelstand bestehen auf Basis dieser Entwicklungen und erster Pilotprojekte vielfältige Möglichkeiten zur Partizipation an der Ausgestaltung der künftigen Energie-Infrastruktur. Die vorliegende Studie stellt in diesem Sinne einen Baustein für weitere Überlegungen durch Mittelstandsforschung und -politik dar, um zielgerichtet an Initiativen und Forschungsprojekten teilzunehmen.

7. Literatur

Agentur für Wirtschaftsförderung Cuxhaven, (27.01.2022). Präsentation, Cux meets HH.

Agora Energiewende, Studie, (02.2021). No-regret hydrogen.

AquaVentus, Präsentation, (04.2021). Aquaventus – Grüner Wasserstoff aus der Nordsee.

BMBF, (02.03.2022). Eine kleine Wasserstoff Farbenlehre. https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/wissenswertes-zu-gruenem-wasserstoff.html, (zuletzt abgerufen am 23.03.2022).

BMVBS, (06.2013). Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS).

BMVi, (2021). https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/102c-scheuer-standortentscheidung-innovations-technologie-zentrum-norden.html, (zuletzt abgerufen am 16.04.2022).

BMWi, (06.2020). Die Nationale Wasserstoffstrategie.

BMWi, (2016). Fortsetzung des NIP Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) 2016 – 2026.

BMWI, (2019). Gewinner des Ideenwettbewerbs „Reallabore der Energiewende“– Steckbriefe.

Brinner, A., et al., (13.04.2018). Technologiebericht 4.1 Power-to-gas (Wasserstoff) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW).

BMWK, (2022). Wasserstoff: Schlüsselelement für die Energiewende. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html, (zuletzt abgerufen am 09.03.2022).

Cardella, U., et al., (2017). Economically viable large-scale hydrogen liquefaction, in: IOP Conf. Series. Eng. 171.

Carneades Hydrogen, (28.04.2022). Investor-Präsentation Latest update from Germany.

Catapult Offshore Renewable Energy, (01.06.2021). Decarbonising maritime operations in North Sea offshore wind O&M.

Chemie.de, Lexikon, (2022). Wasserstoff. https://www.chemie.de/lexikon/Wasserstoff.html, (zuletzt abgerufen am 09.03.2022).

CIMAC, (11.02.2022). Webinar and Discussion: eFuels - Turning the Tide for a Sustainable Maritime Industry.

cruh21 GmbH, (08.03.2022). Unternehmenspräsentation – Innovation möglich machen.

Cuxhavener Nachrichten, (05.05.2022). Start in die Wasserstoff-Produktion.

Dalgic, Y., Dinwoodie, I., Lazakis, I., McMillan, D., Revie, M., (2014). Optimum CTV Fleet Selection for Offshore Wind Farm O&M Activities.

Deloitte, (14.07.2021). Fit for 55. Maßnahmenpaket der EU zur Umsetzung des Green Deal.

Der Nationale Wasserstoffrat, (16.07.2021). Wasserstofftransport.

Dervisic, T., Engström, C., (2021). Electric infrastructure for electrolyser systems.

Det Norske Veritas [DNV], (2019). Maritime forecast to 2050 - Energy Transition Outlook 2019.

Deutsche Energie-Agentur (DENA), (06.2018). Power to X: Technologien, Power Fuels - Power to X: Technologien, im Auftrag der Strategieplattform Power to Gas.

Deutsche WindGuard GmbH, (22.09.2021). Erzeugung von Wasserstoff durch Windenergie auf See.

Deutschen Maritimen Zentrums e.V. [DMZ], Bremerhaven/Bremen, (09.11.2021). Die Rolle der maritimen Wirtschaft bei der Etablierung einer deutschen Wasserstoffwirtschaft.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. [DLR], Köln, (01.09.2020). Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende.

DLR, (09.2020). Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende.

DLR, TUHH, JBV, (10.08.2021). Konzeptionelle und technische Ausgestaltung einer Entwicklungsplattform für Power-to-Liquid-Kraftstoffe, im Auftrag des BMVI.

DNV, (06.2021). Handbook for Hydrogen-fuelled vessels. MarHySafe JDP Phase 1, 1st Edition.

DNV-GL, (2019). Maritime forecast to 2050 – Energy transition outlook.

DOW, (27.09.2019). Standortporträt Stade.

DTU Wind and Energy Systems, (2019). WIND RESOURCE MAP. https://globalwindatlas.info/download/high-resolution-maps/World, (zuletzt abgerufen am 19.04.2022).

DVGW, Presseinformation, (08.09.2021). Normung, Standardisierung und Zertifizierung der Wasserstoff-Transportinfrastruktur.

DWV-Mitteilungen, (01.2022). Heft 1/22 Jahrgang 26.

E-Bridge, (19.05.2022). Wasserstoff-Preisindex „Hydex“. https://www.e-bridge.de/, (zuletzt abgerufen 19.05.2022)

EEA, (19.01.2022). EU-Seeverkehr. https://www.eea.europa.eu/de/highlights/eu-seeverkehr-erster-umweltvertraeg lichkeitsbericht-wuerdigt#:~:text=Der %20See verkehr %20ist %20zentraler %20Bestandteil,auf %20dem %20Seeweg %20tran sportiert %20werden, (zuletzt abgerufen am 07.05.2022).

EMEC, (04.05.2022). Präsentation, EMEC and Hydrogen.

EMEC, (09.03.2018). Investor-Presentation, The Surf ‘n’ Turf Project.

Enapter, (20.10.2020), AEM Wasserelektrolyse, https://www.enapter.com/de/newsroom/ aem-water-electrolysis-how-it-works, (zuletzt abgerufen am 26.04.2022).

Energate, (15.07.2021). Brunsbüttel mit guten Voraussetzungen für Wasserstoffimporte. https://www.energate-messenger.de/news/213781/brunsbuettel-mit-guten-voraussetzungen-fuer-wasserstoffimporte.

EPICO Klimainnovation, (2021). Reality-Check der Nationalen Wasserstoffstrategie Adenauer Reality Check, im Auftrag der Konrad-Adenauer-Stiftung.

Europäische Kommission, (2020). Manifesto for the development of a European “Hydrogen Technologies and Systems” value chain.

Europäische Kommission, (19.11.2020). Offshore Renewable Energy Strategy - Key Technologies.

Europäische Kommission, (o. J.). Paper, Zielvorgaben, Europäische Allianz für sauberen Wasserstoff.

Europäische Kommission, Strategiepapier, (08.07.2021). Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa.

Europäisches Parlament, (12.2021). Sustainable maritime fuels - the FuelEU Maritime proposal.

EWE, (17.12.2020). EWE übernimmt bei Wasserstoffspeicherung Vorreiterrolle. https://www.ewe.com/de/presse/pressemitteilungen/2020/12/ewe-bernimmt-bei-wasserstoffspeicherung-vorreiterrolle-ewe-ag, (zuletzt abgerufen am 13.03.2022).

EWE et al., (24.03.2021). Norddeutscher Grundstein für europäische Wasserstoffwirtschaft.

Ferguson Marine, (14.12.2018). STEP 2018 Annual Conference - Chris Dunn, HySeas III, a Zero Emission Scottish ferry Powered by Renewable Energy.

FfE München, (23.04.2019). Elektrolyse – Die Schlüsseltechnologie für Power-to-X. https://www.ffe.de/veroeffent lichungen/elektrolyse-die-schluesseltechnologie-fuer-power-to-x/, (zuletzt abgerufen am 05.04.2022).

FCH Europa, (2019). Hydrogen Roadmap Europe.

Fraunhofer, (10.2019). Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland.

Fraunhofer-Gesellschaft, (2022). Kompetenzen für das Wasserstoff-Zeitalter. https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/wasserstoff/vom-material-zum-system.html, (zuletzt abgerufen am 01.04.2022).

Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg, (04.2007). Hamburg: Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.

Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Venture, (01.2019). Hydrogen Roadmap Europe.

Greenpeace Energy EG, (01.2020). Blauer Wasserstoff – Lösung oder Problem der Energiewende?

GTT, Präsentation, (09.03.2022). Basics about ammonia storage for sea transportation.

Guidehouse, (04.2020). Extending the European Hydrogen Backbone.

H2-international, (01.2019). The E-Journal on Hydrogen and fuel cells.

HAW Hamburg, (18.07.2019). NEW 4.0 - Norddeutsches Reallabor will Sektorkopplung voranbringen.

Hessen Landesagentur, Studie, (30.06.2020). Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz.

HH Behörde für Wirtschaft und Innovation, (02.2022). Green Hydrogen Hub Europe.

HINT.CO, Präsentation, (04.2022). H2Global Shaping the global energy transition.

Hydrogen Council, (20.01.2020). Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective.

HYON, (11.02.2022). Investor Presentation.

IBB Netzwerk GmbH, (26.07.2021). Weltweit erste Offshore-Produktion von grünem H_2. https://www.ibb-netzwerk-gmbh.com/aktuelles/weltweit-erste-offshore-produktion-von-gr %C3 %BCnem-wasserstoff, (zuletzt abgerufen am 14.04.2022).

IEA, (17.05.2021). Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector

IHK Hamburg, (22.11.2021). Hamburg 2040 – Energie- und Klimahafen Moorburg.

Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik, im Auftrag des DMZ, (09.11.2021). Die Rolle der maritimen Wirtschaft bei der Etablierung einer deutschen Wasserstoffwirtschaft.

IRENA, (2021). A pathway to Decarbonise the shipping sector by 2050.

Jones, E., Qadir, M., et al., (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook.

Kongsberg, (24.12.2021). World's first full-scale hydrogen-based propulsion system launched by Kongsberg.

Konrad-Adenauer-Stiftung e. V., (2021). Reality-Check der Nationalen Wasserstoffstrategie.

Krieg, D., (2012). Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff, in: Reihe Energie & Umwelt, Band 144.

Land Niedersachsen, (2021). Niedersächsische Klimaschutzstrategie 2021.

Landesagentur Hessen, (30.06.2020). Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz.

LEE-NRW, (03.11.2020). Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung.

Linde, (10.12.2019). Latest Global Trend in Liquid Hydrogen Production.

Maersk, (10.03.2022). Maersk engages in strategic partnerships. https://www.mae rsk.com/n ews/artic les/2022/03/10/ maersk-engages-in-strategic-partnerships-to-scale-green-methanol-production, (zuletzt abgerufen am 29.04.2022).

Maersk, News, (24.08.2021). A.P. Moller - Maersk accelerates fleet decarbonisation with 8 large ocean-going vessels to operate on carbon neutral methanol. https://www.maersk.com /news /articles/2021/08/24/maersk-accelerates-fleet-decarbonisation, (zuletzt abgerufen am 25.03.2022).

Maersk, Press Release, (18.08.2021). Maersk secures green e-methanol for the world's first container vessel operating on carbon neutral fuel. https://www.maersk.com/news/articles/2021/08/18/maersk-secures-green-e-methanol, (zuletzt abgerufen am 09.04.2022).

MariGreen, Interreg, Feasibility Study, (10.2018). Perspectives for the Use of Hydrogen as Fuel in Inland Shipping.

McKinsey, FCH Europe, (01.2019). Hydrogen Roadmap Europe.

Mergel, J., Carmo, M., Fritz, D., (2013). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Status on Technologies for Hydrogen Production by Water Electrolysis.

Nationaler Wasserstoffrat, (16.07.2021). Wasserstofftransport.

NDR, (28.02.2022). Vattenfall stoppt vorerst Rückbau des Kraftwerks Moorburg. https://www.ndr.de/nachrichten/ hamburg/ Vattenfall-stoppt-vorerst-Rueckbau-des-Kraftwerks-Moorburg,moorburg400.html, (zuletzt abgerufen 03.04.2022).

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. Niedersächsische Klimaschutzstrategie 2021. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwja-cy37pP6AhXgxwIHHeReD-wQFnoE-CAgQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.umwelt.niedersachsen.de%2Fdownload%2F178369&usg=AOvVaw1Y3lBh_4LUAvzcgG8pSSYU (zuletzt abgerufen am 14.09.2022).

Norled, (12.2021). MF Hydra world's first LH 2 driven ship and the challenges ahead towards ZEMS.

NOW GmbH, (10.2021). NIP - Aktueller Maßnahmenkatalog.

NOW GmbH, (30.09.2019). Strombasierte Kraftstoffe für Brennstoffzellen in der Binnenschifffahrt.

NOW GmbH, (01.04.2022). https://www.hy.land/hyperformer-hyways-for-future/. HyWays for future, (zuletzt abgerufen am 01.04.2022).

Offshore Energy, (03.05.2021). Equinor, Ørsted, Boskalis join AquaVentus offshore wind-to-hydrogen project. https://www.offshore-energy.biz/equinor-orsted-boskalis-join-aquaventus-offshore-wind-to-hydrogen-project/.

Öko-Institut Berlin und Fraunhofer ISI, Studie BMWi, (2015). Klimaschutzszenario 2050.

ORION Clean Energy Project, (04.05.2022). Präsentation, Project Summary.

Prognos, (28.05.2020). Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Wasserstofferzeugung aus Offshore-Windstrom.

PTJ, (09.06.2021). Europäische Wasserstoff Großvorhaben. https://www.ptj.de/ueber-uns/aktuelles/archiv?backRef=84&news=Europaeische_Wasserstoff_Grossvorhaben_ausgewaehlt, (zuletzt abgerufen am 13.04.2022).

RSK, Vattenfall, (11.2021). HT1 Hydrogen Demonstrator Project.

Scottish Enterprise, (08.2021). Development of early, clean hydrogen production in Scotland.

Scottish Government, (09.11.2021). Draft Hydrogen Action Plan.

Scottish Government, (11.2021). SEA of the Draft Hydrogen Action Plan for Scotland.

Scottish Government, (12.2020). Scottish Offshore Wind to Green Hydrogen Opportunity Assessment.

Shell Deutschland und Wuppertal Institut, Hamburg, (15.06.2017). Shell Wasserstoff-Studie - Energie der Zukunft?.

Siemens AG, PM, (30.06.2015). „Grüner“ Wasserstoff bietet viele Perspektiven für eine nachhaltige Zukunft.

Smolinka, T., Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, (2009). Water Electrolysis.

Stiftung Offshore-Windenergie, (22.09.2021). Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Windenergie auf See – Potenzial und Bedarf in Deutschland, (zuletzt abgerufen am 13.05.2022).

Tilia GmbH, (09.07.2021). Machbarkeitsstudie: Konversion des Heizkraftwerkes Hamburg Moorburg.

Tjarks, G., (2017). PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen, in: Energie & Umwelt, Band 366.

Trittin, T., in: Informationen zur Raumentwicklung, Heft 5, (2004). Wasserstoffherstellung im Offshore-Bereich und Wasserstoffversorgung.

Umweltbundesamt, (03.09.2021). Treibhausgasminderungsziele Deutschlands. https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands, (zuletzt abgerufen am 17.03.2022).

Vattenfall, PM, (22.01.2021). Wasserstoffprojekt am Standort Hamburg-Moorburg.

VBW, (12.2022). Klima 2030. Nachhaltige Innovationen.

VSM, (12.2016). e4ships, Brennstoffzellen im maritimen Einsatz - 2009 – 2016.

VSM, PM, (14.09.2021). Brennstoffzellen dürfen endlich an Bord – IMO finalisiert.

Westcon, (17.08.2021). MF Hydra Vessel Information.

Windkraft-Journal (26.08.2021). TU Hamburg untersucht Aufbau einer Infrastruktur für eine zukünftige klimaneutrale Energieversorgung

Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer, (07.11.2019). Norddeutsche Wasserstoff Strategie.

WirtschaftsWoche, (21.01.2022). FLÜSSIGERDGAS-IMPORTE - Warum Deutschland fast als einziges Land keine LNG-Terminals hat. https://www.wiwo.de/politik/deutschland/fluessigerdgas-importe-warum-deutschland-fast-als-einziges-land-keine-lng-terminals-hat/27994348.html, (zuletzt abgerufen am 23.04.2022)

Wissenschaftlicher Dienst, Deutscher Bundestag, WD 5 - 3000 - 029/20, (03.04.2020). Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff.

WirtschaftsWoche, (27.01.2022). Tracking der Energiewende. https://www.wiwo.de/technologie/tracking-der-energiewende/.Agentur für Wirtschaftsförderung Cuxhaven, (27.01.2022). Präsentation, Cux meets HH.

ZKR, (09.12.2021). Roadmap der ZKR zur Verringerung der Emissionen in der Binnenschifffahrt. Agora Energiewende, Studie, (02.2021). No-regret hydrogen.

8. Anhang

Tabelle A 1: Auswahl aktueller Wasserstoff-Schiffe und Projekte im Jahr 2022

Country	Location	Company	Model	Type	Hulk	Propulsion	Storage	Fuelling	Top Speed	Status	Further Information	Certificate/ Classification	Climate-Tag
Belgium	**Antwerpen**	cmb.tech	**Powerbarge**	Mobile power station	displacement hull	4x V16 BeHydro monofuel Hydrogen gensets, generating 10.7MW in total.	5 tonnes of Hydrogen storage	unkown	unkown	In planning		uncertain yet	low-emission
Belgium	**Oostende/ Zeebrugge**	cmb.tech	**Hydrocat**	CTV	aluminum catamaran	Engines 2 x MAN D2862 LE448	207 kg H_2	Truck trailer with H_2 gas cylinders refuelling ferry by means of hose.	30 knots	Activ for Vattenfall Windpark.	The workboats have a track record of over 950,000 transfers, and the design of the vessel results in a fast and safe transfer of offshore personnel.	Lloyd's 100A1 SSC, HSC, Catamaran, Wind Farm Service Vessel.	low-emission
Belgium	**Kruibeke to Antwerp**	cmb.tech	**Hydroville**	Passenger ferry (offshore CTV in summer holidays)	aluminum catamaran	2x DualFuel (**MAN** Diesel and Hydrogen) engines. 200 bar Hydrogen storage pressure	12x Hydrogen cylinders 36 kg of useable Hydrogen	Truck trailer with H_2 gas cylinders refuelling ferry by means of hose.	27 knots	Activ, ferry to avoid traffic jams and used to organise trips to the offshore wind turbine parks.	Multiple risk analyses were performed during the design phase. Demonstration project für commercial DualFuel systems in WindParks.	Certificate of Class from the Lloyd's Register Group to burn Diesel and Hydrogen in the two combustion engines.	low-emission
Belgium	**Antwerpen**	cmb.tech	**Hydrotug**	Tug	displacement hull	2 x2 MW Hydrogen combustion engines.	400 kg of Hydrogen is stored	unkown	unkown	The tugboat is expected to become fully operational in the first quarter of 2023.	Each Hydrogen refuelling saves the total emissions of 1 car for 1 year.	uncertain yet	low-emission
Denmark	**globally**	A.P. Møller - Mærsk A/S	**Panamax Methanol fleet**	Containership	displacement hull	DualFuel, Methanol and Diesel gas-mixture. Diesel as redundant technology.	16.000 m^3 Methanol	unkown	unkown	Under construction, to be launched from 2024 until 2030.	The fleet will initially consist of 13 vessels.	uncertain yet	low-emission
France	**Paris**	Compagnie fluvial de transport (cft)	**Zulu 2**	Hydrogen Pallet Barge	displacement hull	Zulu will be supplied by **ABB** Marine & Ports, with two 200 kW PEM fuel cells from **BALLARD**.	350 kg of 300 bar H_2	H_2 Container on top.	unkown	Activ	European Cargo-Flagship, two more barges are being produced.	Compagnie Fluvial de Transport	emission-free
France	**Brittany maritime cluster Pôle Mer Bretagne Atlantique**	Piriou	**tbn**	CTV	catamaran	Main engines power: 2 x 1000 kW. FuelCell power: 2 x 140 kW.	Hydrogen is stored in a 20-foot container	unkown	25 knots	Conceptual (planning since 2019), to be delivered end of 2023.	decided to meet the challenge. Drawing on its experience in crew transfer to oil fields, in the delivery of over a hundred 18m to 55m crew boats, and the building of about ten 27m and 22m CTVs for wind farms	uncertain yet	emission-free
Germany	**Berliner Westhafen**	BEHALA	**Elektra**	Pushtow	displacement hull	Bulkhead rudder propeller 2x210 kW. 3x **BALLARD**-FuelCell. 3x100 kW 2×1025 kWh for propulsion and 300 kWh for wiring system.	Mobile Hydrogen pressure tanks dock⊠ nominal pressure 500 bar⊠ capacity of 750 kg	Exchangeable tanks for (Multiple Energy Gas Container - MEGC). Own on-board crane for pressure cylinder containers.	10.3 knots	Activ, under test operations.	Supra-regional travel is carried out ⊠ with the three fuel cells and ⊠ in the regional journey in battery operation.	Acceptance takes place during test operation, type of classification unknown.	emission-free
Germany	**Hamburg**	Hamburger Hochbahn - TG ATG Alster Touristik GmbH	**FCS Alsterwasser**	Passenger ferry (100)	Launch / Longboat	2 × 48 kW PEFC FuelCell (140 V DC) from Proton Motor Fuel Cell GmbH with integrated 7 lead-gel batteries (each 80 V in series 360 Ah); Three-phase electric motor (100 kW); bow thruster (20 kW).	12 x 50 kg (178 l) (350 bar)	Gaseos Hydrogen refuelling station from **Linde.**	7.6 knots	Off-duty (2008-2014)	Bunker station was degraded. (**Linde** AG) Ferry came all three days for bunker purpose.	DNV-GL	emission-free
Germany	**Hamburg**	Fraunhofer, BMVI	**Water Cargo Barge**	Barge	displacement hull	Electric cells and batteries instead of Hydrogen (for the time being according to the study).	Battery	Concept, under discussion in the senate. Since the Alsterwasser project in Hamburg failed and **Linde** dismantled the H2 filling station, Hydrogen was not considered as an alternative for the time being. The city traffic should be relieved, but at the same time the water bodies would have to be repaired.				uncertain yet	emission-free
Germany	**Cuxhaven**	Turneo, Entec	**Coastal Liberty**	SOV	displacement hull	DualFuel. Diesel-H_2 mixture. Diesel as back-up. Manufacturer not published.	400 kg (350 bar) containerized bottle-system	Exchangeable tanks for (Multiple Energy Gas Container - MEGC).	unkown	Retrofitting the vessel to take place soon.	The conversion of the ship is carried out in dependence on the installation of the electrolyser.	uncertain yet	low-emission
Iceland	**Reykjavik**	Smart H2	**The Elding**	Tourist-Ship, Whale Watching	displacement hull	Main engine Diesel, additional 10 kw **BALLARD** FuelCell engine.	Since 2009, Marine Fuel Cell Auxiliary System. The first fuel cell system on a commercial sea-going ship. Difficult realisation of the project mainly due to the financial environment. There is no indication of problems related to the use of Hydrogen on board ships (2009).					uncertain yet	low-emission
Japan	**Inland sea**	cmb.tech	**HydroBingo**	Passenger ferry (80)	aluminum catamaran	Co-firing engine that combines Hydrogen with Diesel fuel.	Movable Hydrogen storage tank installed at the rear.	Car trailer with H_2 gas cylinders is pushed up aft.	22 knots	Activ	120 km range with H_2-Diesel mixture and 780 km range with Diesel.	TFC has been certified as "Innovation Endorsement" by Class NK.	low-emission
Netherlands	**Amsterdam**	Lovers	**Nemo H2**	Passenger ferry (87) (Canal tour)	Launch / Longboat	60-70 kW PEM FuelCell and an integrated 30-50 kW battery. 11 kW electric bow thruster and a 55 cm/75 kW electric azimuth thruster	6 x 24 kg H_2 (350 bar)	Gaseos Hydrogen refuelling station.	9 knots	Since 2009 activ.	9-hour range with 9 knots speed.	DNV GL have already guidelines for the installation of fuel cells since 2016.	emission-free
Norway	**Hjelmeland**	Norled	**MF HYDRA**	Ro-Ro / 229 Passenger ferry and 80 cars	displacement hull	**BALLARD** Power supplies fuel cells (2x200 kW and generator 2x440 kW⊠ and liquid Hydrogen	80 m^3 LH_2	Mobile with trailer and compressor from LH_2 truck trailer.	9 knots	Activ, built and **BALLARD** Wave™ close to be installed.	So far, the ferry runs on battery power.	IMO Certificate for Maritime and Inland Transport for **BALLARD** Wave™.	emission-free
Norway	**Offshore Windfarms**	Edda Wind	**CSOV**	SOV	displacement hull	200 kW pilot of the LOHC/FuelCell propulsion system.	unknown	Hydrogenoius LOHC Liquid.	unkown	Being produced (1x Jan24 / 1x Jul24).	LOHC should enable ZEMS.	DNV has signed a classification contract.	emission-free
Orkney Islands Scotland	**Kirkwall and Shapinsay**	Ferguson Hydrogen Ferry	**Hyseas III**	RoPax ferry 120 passenger 20 pass. vehicles or two trucks	displacement hull	Full-scale electric propulsion system based on Hydrogen-powered FuelCell. 6x100 kW **BALLARD** HD-100 FuelCell, Lithium-ion batteries.	600 kg (350 bar)	LKW with Gastubes drives onbord an refills tank.	9.5 knots	Close to be launched, postponed several times.	Total Cost 10.8 mio; EU support 7.9 mio.	The next stage is to seek the DNV Classification Society's feasibility approval in principle of the designs.	emission-free
USA	**Bellingham, WA San Francisco Bay**	Switch Maritime	**Sea Change ferry**	Passenger ferry (75)	aluminum catamaran	Twin 300-kilowatt (400-hp) electric motors. (**Cummins**). 360 kW of Cummins fuel cells and Hexagon hydrogen storage tanks	246 kg	Mobile from truck gas tank.	22 knots	Activ, built and close to launch.	Build the first, prove the concept. The first domino paves a path to widespread industry adoption. Range 300 nm.	US Coast Guard Approval.	emission-free
USA	**San Francisco**	Red and White Fleet	**SF-Breeze**	Passenger Ferry (150)	catamaran	Propulsion power 4.4 MW, installed: 4.92 MW.	2000 kg LH_2	Refuelling station planned.	35 knots	Conceptual (only planning stadium), but imminent conclusions for Sea Change ferry project in San Francisco.		DNV will classify the ship.	emission-free
Ships for the Hydrogen infrastructure.													
Australia - Japan	**Kawasaki Suiso Frontier**	Kawasaki Heavy Industries Ltd.	**Suso Frontier**	LH_2 Carrier	displacement hull	Diesel-electric propulsion.	unknown	MGO Terminal	13 knots	Operating since Q1 2022.	Demonstrating pilot project of a LH_2 Carrier	Japan/ClassNK.	emitting
Germany	**globally**	Hartmann Reederei	**Gaschem Hamburg**	Ship Type 2G, LPG/NH_3 Carrier	displacement hull	3x Hyundai MAN B&W 6S50MC-C7, MGO.	131 m^3 MGO	MGO Terminal	16.5 knots	Operating since 2010.	Demonstrates the advantage of ammonia as an H_2 derivative compared to LH_2 or methanol, as this has already been transported by ships for years.	LR +100A1 Liquefied Gas Carrier, Ship Type 2G, anhydrous ammonia, butadiene, butane, butane and propane mixtures, butylene, propane and propylene in independent tanks type A.	emitting
KONGSBERG, HYON, Cmb.tech, Maersk, DFDS and several more companies are having further plans for the mid-term construction of Chemical Tankers, CTVs, OSVs, Dry Bulk Carriers, Container Vessels and more types.													

Quellen Tabelle A 1.: https://www.globalmaritimeforum.org/content/2021/09/Report-on-Climate-Commitments-by-Signatories-to-the-Call-to-Action-for-Shipping-Decarbonization.pdf (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://ship.energy/2022/05/11/Hydrogen-powered-ctv-following-successful-bunkering/ (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.globalmaritimeforum.org/content/2021/09/Report-on-Climate-Commitments-by-Signatories-to-the-Call-to-Action-for-Shipping-Decarbonization.pdf (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.globalmaritimeforum.org/content/2021/09/Report-on-Climate-Commitments-by-Signatories-to-the-Call-to-Action-for-Shipping-Decarbonization.pdf (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.youtube.com/watch?v=pgqKSDCTv1A (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://flagships.eu/2021/04/07/worlds-first-Hydrogen-cargo-vessel-set-for-paris-debut/ (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:3398269/mmsi:205529490/imo:0/vessel:ZULU_02 (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://swzmaritime.nl/news/2022/02/11/flagships-Hydrogen-powered-river-barge-zulu-06-on-its-way-to-france/ (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.rivieramm.com/news-content-hub/piriou-unveils-ctv-with-Hydrogen-hybrid-propulsion-61954 (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.marineinsight.com/shipping-news/piriou-develops-crew-transfer-vessel-ctv-with-Hydrogen-hybrid-propulsion/ (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://Hydrogen-central.com/occitanie-region-hybrid-ship-Hydrogen-revolutionizing-shipbuilding/ (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.behala.de/elektra/ (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://de.wikipedia.org/wiki/Zemships (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.abendblatt.de/ratgeber/wissen/article132332343/Das-Hamburger-Wasserstoff-Schiff-liegt-still.html#:~:text=Zwei%20Brennstoffzellen%20mit%20Leistungen%20von,die%20es%20mit%20Wasserstoff%20beliefert. (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), Machbarkeitsstudie WaCaBa (https://www.hamburg.de/contentblob/16165002/da6966dc9d91819d9b6788cdc68ea5e6/data/wacaba-endbericht-machbarkeitsstudie.pdf) (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://newenergy.is/en/portfolio/smart-h2/ (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.globalmaritimeforum.org/content/2021/09/Report-on-Climate-Commitments-by-Signatories-to-the-Call-to-Action-for-Shipping-Decarbonization.pdf (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.interreg-danube.eu/uploads/media/approved_project_public/0001/39/c510e9deb4535f5d155ca9bf03d2db786a443a8f.pdf (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://fuelcellsworks.com/news/norse-group-announces-launch-of-mf-hydra-worlds-first-lh2-driven-ferry-boat/ (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.Hydrogenious.net/index.php/de/2021/07/02/lohc_maritime_de/ (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://fuelcellsworks.com/news/edda-wind-orders-three-additional-Hydrogen-ready-commissioning-service-operation-vessels-csov/ (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.offshorewind.biz/2022/04/06/dnv-to-class-edda-winds-Hydrogen-ready-csovs/ (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.greencarcongress.com/2021/12/20211204-kongsberg.html (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://elib.dlr.de/132926/1/ELMAR-REGWA%20Paper_v6.pdf (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.switchmaritime.com (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/articles/ABS%20SF%20Breeze%20in%20BCS.pdf (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.allamericanmarine.com/foghorn-sea-change/ (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.hartmann-reederei.de/shared_files/fleet/pdf/ship-info/hamburg.pdf (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/LL1140937/DFDS-plots-green-transition-as-it-plans-future-fleet-strategy (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), eigene Darstellung

Tabelle A 2: H_2-Derivate zum Ersatz fossiler Brennstoffe

	Referenzwerte anhand realer Schiffstypen			Bei identischer Reichweite müssen die H_2-Derivate folgende Tankvolumina aufweisen					Vergleich der MGO Tankgrößen	Eine H_2-Betankung (700 Bar) des jeweiligen Schiffstyps entspricht folgender Anzahl H_2-Kfz-Betankungen (5 kg Tank, 700 Bar)	Quelle für Tankgrößen nach Schiff
	Einheiten	MGO Tankkapazität	MGO Marinediesel	LNG	H_2 (700 Bar)	LH_2	Methanol	Ammoniak			
Ein Tankinhalt Marinediesel (MGO) würde folgender Menge des Derivats entsprechen:			1	1,56	4,88	4,31	2,32	2,88			
CTV (11m)	nm^3	0,9	0,9	1,41	4,39	3,88	2,08	2,59	1	176	seaboats.net
	Liter	900	900	1.408		3.875	2.085	2.594			
OSV (Coastal Liberty, 43m)	nm^3	25	25	39	122	108	58	72	28 x CTV	4.880	actamarine.com
	Liter	25.000	25.000	39.103		107.647	57.911	72.047			
Panamax (Maersk Methanol Ship, 348m)	nm^3	6625	6625	10.362	32.330	28.526	15.347	19.093	7361 x CTV	1.293.097	freightwaves.com
	Liter	6.624.471	6.624.471	10.361.351		28.524.191	15.345.293	19.090.994			

Quellen: https://www.seaboats.net/11m-crew-transfer-vessel-for-charter-1380066 (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.actamarine.com/documenten/specs/total_fleet_nieuw_logo_01-2018/coastal_liberty.pdf (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), https://www.freightwaves.com/news/how-many-gallons-of-fuel-does-a-container-ship-carry#:~:text=Container%20ships%20that%20can%20go,2%20million%20gallons%20of%20fuel (zuletzt abgerufen am 07.09.2022), eigene Berechnung