



Maritime Wasserstoffanwender und ihr Anteil am H₂-Bedarf Deutschlands

Eine Studie im Auftrag des Deutschen Maritimen Zentrums

Eine Studie im Auftrag des



Deutsches Maritimes Zentrum e.V.

Hermann-Blohm-Str. 3 | 20457 Hamburg | www.dmz-maritim.de

Autoren:

Martin Zerta (LBST)

Dr. Leo Diehl (LBST)

Hubert Landinger (LBST)

Johannes Moll (LBST)

Peter Klemm (IfS)

Gunter Sattler (IfS)

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)
Daimlerstr. 15 | 85521 Ottobrunn | www.LBST.de

Ingenieurbüro für Schiffstechnik – Beratende Ingenieure
Bahnhofstr.15 | 21481 Lauenburg/Elbe

Haftungsausschluss

Der Mitarbeiterstab der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH und des Ingenieurbüros für Schiffstechnik haben diesen Bericht erstellt.

Die Sichtweisen und Schlüsse, die in diesem Bericht ausgedrückt werden, sind jene der Mitarbeitenden der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH sowie der beteiligten Partner. Alle Angaben und Daten sind sorgfältig recherchiert. Allerdings gibt weder die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH noch irgendeiner ihrer Mitarbeitenden oder Unterauftragnehmer irgendeine ausdrückliche oder implizierte Garantie oder übernimmt irgendeine rechtliche oder sonstige Verantwortung für die Korrektheit, Vollständigkeit oder Nutzbarkeit irgendeiner Information, eines Produktes oder eines enthaltenen Prozesses.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGEN.....	4
KURZZUSAMMENFASSUNG	7
EXECUTIVE SUMMARY.....	17
1. H₂ IN DEN MARITIMEN TEILBRANCHEN.....	27
1.1. Zusammenfassung.....	27
1.2. Schifffahrt	28
1.2.1. Zusammenfassung.....	28
1.2.2. Überblick und Definitionen	28
1.2.3. Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Derivate	36
1.3. Häfen	47
1.3.1. Zusammenfassung.....	47
1.3.2. Überblick und Definitionen	48
1.3.3. Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Derivate	58
1.4. Schiffbau und Zulieferer	65
1.4.1. Zusammenfassung.....	65
1.4.2. Überblick und Definitionen	65
1.4.3. Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Derivate	68
1.5. Meerestechnik.....	71
1.5.1. Zusammenfassung.....	71
1.5.2. Überblick und Definitionen	71
1.5.3. Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Derivate	72
2. BEWERTUNG & PERSPEKTIVEN DER H₂-Anwendung IN MARITIMEN TEILBRANCHEN.....	73
2.1. Zusammenfassung.....	73
2.2. Methodik / Vorgehen	73
2.2.1. Schifffahrt.....	74
2.2.2. Häfen	81
2.2.3. Schiffbau und Zulieferer.....	82
2.2.4. Meerestechnik	85
3. METHODIK ZUR MENGENABSCHÄTZUNG	86
3.1. Zusammenfassung.....	86
3.2. Beschreibung Szenarien, methodischer Ansatz (Annahmen) und Datenbasis.....	86
3.2.1. Schifffahrt.....	88
3.2.2. Häfen	92
3.2.3. Schiffbau und Zulieferer.....	95
3.2.4. Meerestechnik	97
4. H₂-Bedarf DER MARITIMEN BRANCHE IM VERGLEICH	98
4.1. Ermittlung des zukünftigen H ₂ -Bedarfs der maritimen Branche	98
4.2. Sensitivitäten, Diskussion und Einordnung.....	99
5. ERGEBNISSE UND ERKENNTNISSE DER STUDIE.....	102
6. QUELLEN UND LITERATUR.....	108

ABKÜRZUNGEN

a	Anno / Jahr
BRZ	Bruttoraumzahl
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BZ	Brennstoffzelle
CGH ₂	Druckwasserstoff
CLP	Classification, Labelling and Packaging of substances and mixtures (Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen)
GWh	Gigawattstunden
H ₂	Wasserstoff
IMO	International Maritime Organization
kWh	Kilowattstunden
LH ₂	Flüssigwasserstoff
LNG	Flüssigerdgas
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carriers (flüssige organische Wasserstoffträger)
MeOH	Methanol
Mio.	Millionen
N ₂	Stickstoff
Nfz	Nutzfahrzeuge
NG	Erdgas
NH ₃	Ammoniak
NIR	National Inventory Report
NWR	Nationaler Wasserstoffrat
PtX	Power-to-X (synthetische Brenn-, Kraft- und Grundstoffe aus elektrischer Energie)
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
THG	Treibhausgase
TRL	Technischer Reifegrad
TWh	Terawattstunden
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VDR	Verband Deutscher Reeder
VM	Verbrennungsmotoren
VSM	Verband für Schiffbau und Meerestechnik
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mögliche Wasserstoffbedarfe der maritimen Teilbranchen	9
Tabelle 2:	Potential H ₂ demand throughout the maritime sub-sectors	19
Tabelle 3:	Mechanische und elektrische Gesamtleistung sowie mechanische Leistung des Hauptsystems in der Seeschifffahrt	31
Tabelle 4:	Mechanische Leistung des Hauptsystems in der Binnenschifffahrt (eigene Berechnungen aus WSV-Statistik).....	32
Tabelle 5:	Mechanische und elektrische Leistung der Hilfssysteme in der Seeschifffahrt	33
Tabelle 6:	Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch und Emissionen verschiedener Schiffstypen im Jahr 2019 in t/a pro Schiff	34
Tabelle 7:	Durchschnittliche Kraftstoffverbräuche je Schiffstyp im Jahr 2021 in t/a/Schiff.....	36
Tabelle 8:	Brennstoffzellen in Schiffen, Zusammenstellung (Demo-)Projekte und kommerzieller Aktivitäten ..	37
Tabelle 9:	Methanol in Schiffen mit Verbrennungsmotor, Bauprojekte und existierende Schiffe	41
Tabelle 10:	Deutsche Seehäfen nach Güterumschlag	48
Tabelle 11:	Deutsche Binnenhäfen nach Güterumschlag.....	49
Tabelle 12:	Energieverbrauch Hafen Bremerhaven	53
Tabelle 13:	Bestand Hafenumschlaggeräte in Seehäfen 2021	56
Tabelle 14:	Bestand Hafenumschlaggeräte in Binnenhäfen 2021.....	56
Tabelle 15:	Hochgerechneter Energiebedarf der deutschen Seehäfen	58
Tabelle 16:	Energiebedarf der deutschen Häfen	58
Tabelle 17:	Relevante H ₂ -Projekte im Hafenumfeld.....	59
Tabelle 18:	Aktivitäten Hafenumschlaggeräte.....	64
Tabelle 19:	Energiebedarfe relevanter Wirtschaftszweige innerhalb der maritimen Zulieferindustrie (eigene Berechnung auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes)	68
Tabelle 20:	Aktivitäten im Bereich Wasserstoff oder Derivate ausgewählter (Schiffbau-)Zulieferer aus Deutschland (ohne Stahlindustrie), basierend auf Informationen der jeweiligen Websites	69
Tabelle 21:	Seeschifffahrt – Einschätzung Reifegrade für ausgewählte Seeschiffe und H ₂ -Pfade anhand TRL.75	
Tabelle 22:	Reifegrade anhand der TRL-Klassifizierung.....	76
Tabelle 23:	Sicherheit: CLP-Klassifikation relevanter etablierter sowie alternativer Kraftstoffe (nach Safety Data Sheets der einzelnen Kraftstoffe).....	77
Tabelle 24:	Einordnung Reifegrade von Hafen- und Rangierfahrzeugen	81
Tabelle 25:	Mögliche Wasserstoffanwendungen im Schiffbau und ihr technischer Reifegrad (TRL)	83
Tabelle 26:	Technische Machbarkeit (NICHT Reifegrad) für Wasserstoffanwendung in Teilprozessen der Gießereien nach Innoguss	84
Tabelle 27:	Mögliche Wasserstoffanwendungen in der Meerestechnik und ihr technischer Reifegrad	85
Tabelle 28:	Schifffahrt: Annahmen Bottom-Up.....	89
Tabelle 29:	Schifffahrt: Annahmen je Szenario	90
Tabelle 30:	Häfen: Annahmen je Szenario	93
Tabelle 31:	Schiffbau und Zulieferer: Annahmen je Szenario	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zusammenfassung der abgeschätzten H ₂ -Bedarfe bzw. seiner Derivate der maritimen Teilbranchen bis 2045	9
Abbildung 2:	Summary of potential H ₂ demands and derivatives until 2045	19
Abbildung 3:	Deutsche Handelsflotte nach Schiffskategorie, Anteile in %	29
Abbildung 4:	Anzahl Schiffe der deutschen Handelsflotte, ab BRZ100, Stand Januar 2023	29
Abbildung 5:	Binnenschiffe in Deutschland nach Schiffskategorie, Anteile in %	30
Abbildung 6:	Anzahl der registrierten Binnenschiffe in Deutschland im Jahr 2021	30
Abbildung 7:	Primärenergieverbrauch der deutschen Schifffahrt in GWh/a	34
Abbildung 8:	Gesamte jährliche CO ₂ -Emissionen je Schiffstyp.....	35
Abbildung 9:	NPorts - Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen.....	52
Abbildung 10:	Port of Kiel - Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen	52
Abbildung 11:	Rostock Port - Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen (nach RP 2020)	53
Abbildung 12:	Hafenumschlaggeräte - Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen in Seehäfen	57
Abbildung 13:	Hafenumschlaggeräte - Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen in Binnenhäfen	57
Abbildung 14:	Bereitstellungspfade alternativer Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom.....	74
Abbildung 15:	Schematische Darstellung Brennstoffzellen (BZ) für unterschiedliche Hilfssysteme im Kreuzfahrtschiff.....	80
Abbildung 16:	Darstellung möglicher H ₂ -Anwendungen in „Fabriksystemen“	82
Abbildung 17:	Schematische Darstellung der Szenarien zum Wasserstoffanteil am Energiebedarf zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2045	87
Abbildung 18:	Definition der betrachteten Zeiträume in dieser Studie	88
Abbildung 19:	Ansätze zur Entwicklung robuster Bedarfsabschätzung unter Berücksichtigung der verfügbaren Datenbasis und -qualität	88
Abbildung 20:	Bedarfe für Schifffahrt basierend auf NIR (Top-Down) entsprechend den beiden Szenarien Präferenz Elektrifizierung und Präferenz Wasserstoffanwendung	91
Abbildung 21:	Bedarfe für Schifffahrt basierend auf Hochrechnung (Bottom-Up) entsprechend den beiden Szenarien Präferenz Elektrifizierung und Präferenz Wasserstoffanwendung	92
Abbildung 22:	Bedarfe für Hafenumschlaggeräte entsprechend den beiden Szenarien Präferenz Elektrifizierung und Präferenz Wasserstoffanwendung	94
Abbildung 23:	Bedarfe für Häfen (Mischansatz) entsprechend den beiden Szenarien Präferenz Elektrifizierung und Präferenz Wasserstoffanwendung	95
Abbildung 24:	Bedarfe für Schiffbau und Zulieferer (Top-Down) entsprechend den beiden Szenarien Präferenz Elektrifizierung und Präferenz Wasserstoffanwendung.	97
Abbildung 25:	Abschätzung der H ₂ -Bedarfe (und Derivate) für die deutsche maritime Branche	98
Abbildung 26:	Einordnung der heutigen und erwarteten H ₂ -Bedarfe in TWh/a	101

KURZZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund und Motivation

In dieser Studie wird im Auftrag des Deutschen Maritimen Zentrums (DMZ)¹ die mögliche und zukünftige Rolle des grünen Wasserstoffs und seiner Derivate (z. B. Methanol, Ammoniak) in den maritimen Teilbranchen Schifffahrt, Häfen, Schiffbau und Zulieferer sowie Meerestechnik untersucht. Neben möglichen Bedarfen werden auch Synergien mit anderen Sektoren aufgezeigt und Empfehlungen abgeleitet.

Es bedarf eines gemeinsamen Verständnisses über die möglichen Lösungsansätze, der potenziellen Wasserstoffbedarfe und der relevanten Anwendungen innerhalb der maritimen Teilbranchen.

Die maritime Branche steht – wie die gesamte Gesellschaft – unter Druck, Konzepte und Strategien zur Dekarbonisierung zu entwickeln und aufzuzeigen. Insbesondere erneuerbare Wasserstoffanwendungen (und die seiner Derivate) bieten dazu einen vielversprechenden Pfad zur erfolgreichen Emissionsreduzierung.

Mithilfe robuster Abschätzungen möglicher Technologieentwicklungen, spezifischer Entwicklungsszenarien bis zum Jahr 2045, Experteninterviews und Literaturlauswertungen wird im Rahmen dieser Studie eine erste Grundlage für die weitere Strategie-, Konzept- und Umsetzungsplanung für die maritime Branche geschaffen.

Vorgehen und Aufbau dieser Studie

Die Studie beleuchtet Perspektiven für die kurz- (bis 2025), mittel- (bis 2030) und langfristige (bis 2045) Anwendung von erneuerbarem Wasserstoff (und seiner Derivate). Grundsätzlich werden dabei unterschiedliche erneuerbare Kraftstoffe, die aus grünem Strom (e-) erzeugt werden, berücksichtigt:

- Druckwasserstoff (e-CGH₂) mit 35 bis 70 MPa
- Ammoniak (e-NH₃)
- Flüssigwasserstoff (e-LH₂)
- Flüssigerdgas (e-LNG)
- Methanol (e-MeOH)
- Diesel (e-Diesel)

Die vorliegende Arbeit ist durch alle Kapitel so strukturiert, dass jederzeit zwischen den verschiedenen Teilbranchen differenziert werden kann.

Kapitel zur Schifffahrt umfassen dabei sowohl die Binnen- als auch die Seeschifffahrt, jedoch nicht Fischerei und militärische Seefahrt. Als wesentliche Datengrundlage dienen die Statistiken des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)² sowie der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)³.

¹ Siehe: www.dmz-maritim.de, zuletzt abgerufen am 14.07.2023.

² Siehe: www.bsh.de, zuletzt abgerufen am 14.7.2023.

³ Siehe: www.gdws.wsv.bund.de, zuletzt abgerufen am 14.7.2023.

Die deutsche Handelsflotte agiert international und bunkert nicht ausschließlich in Deutschland. Daher ermittelt diese Studie nicht allein die Wasserstoffnachfrage in Deutschland (die auch durch internationale Reeder entsteht), sondern betrachtet und diskutiert zudem die prognostizierte durch deutsche Reeder entstehende internationale Nachfrage.

Kapitel zu Häfen umfassen sowohl Binnen- als auch Seehäfen. In der Untersuchung werden die Terminals als auch die umliegende Infrastruktur, jedoch keine ansässige Industrie einbezogen.

Kapitel zum Schiffbau und seiner Zulieferindustrie betrachten prinzipiell alle Arten von Werften in Deutschland. Die Zulieferindustrie wird ohne Dienstleister und im Wesentlichen als die Betriebe aus Stahlerzeugung, Metallverarbeitung und Maschinenbau betrachtet.

Die Kapitel zur Meerestechnik betrachten eine sehr heterogene Verbrauchsstruktur und erfassen aufgrund der (noch relativ) kleinen Offshore-Industrie in Deutschland hauptsächlich Kleinanwendungen und Unterseetechnik. Auch hier sind Aquakultur und Fischerei ausgeschlossen.

Um mögliche Wasserstoffanwendungen zu identifizieren und schließlich zu quantifizieren, wurde zunächst im **Kapitel 1** für alle Teilbranchen analysiert, welche energieverbrauchenden Prozesse vorliegen und ob und wie Wasserstofflösungen diese abdecken können.

Im **Kapitel 2** wurde die technische Reife jeweils eingeordnet (Technology Readiness Level – TRL) und eine perspektivische Umsetzbarkeit entwickelt.

Im **Kapitel 3** wurden über die jeweilig robusteste Datenbasis sowie die technischen Einschätzungen Methoden zur Hochrechnung sowie spezifische Szenarien für die Wasserstoffanwendungen in den maritimen Teilbranchen entwickelt.

Schließlich erfolgten mit **Kapitel 4** eine Hochrechnung des potenziellen Wasserstoffbedarfs bzw. der Derivate je Teilbranche und eine erste Einordnung der Ergebnisse.

Kapitel 5 fasst die Ergebnisse und wesentlichen Erkenntnisse zusammen und leitet Schlussfolgerungen bzw. Empfehlungen für die jeweilige maritime Teilbranche ab.

Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse und Empfehlungen

Für die gesamte maritime Branche wird langfristig ein jährlicher Bedarf von über > 119 TWh (> 3,5 Mio. Tonnen) Wasserstoff bzw. Derivate erwartet (siehe Abbildung 1 und Tabelle 1). Entsprechend der aktuellen Verteilung des Energiebedarfs dominiert die Schifffahrt mit ca. 95 % Anteil und dabei die internationale Seeschifffahrt im Speziellen. Sie erreicht allein etwa 114 TWh (3,4 Mio. Tonnen) pro Jahr. Wobei der Großteil des Bedarfs erst langfristig zu erwarten ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dieser Bedarf durch die Handelsflotte weltweit erzeugt wird. Einschätzungen des Nationalen Wasserstoffrats lagen für die Teilbranche Schifffahrt mit bis 0,08 Mio. Tonnen (bis zum Jahr 2030) und langfristig (2040–2050) ca. 0,25 Mio. Tonnen pro Jahr deutlich darunter, betrachteten jedoch nicht die vollständige deutsche Handelsflotte, sondern nur die prognostizierten Bedarfe der deutschen Schiffe in deutschen Häfen.

Die Binnen- und Küstenschifffahrt erzeugt einen Bedarf zwischen 1 und 3,8 TWh (30.000 bis 115.000 Tonnen) Wasserstoff pro Jahr, wobei die große Bandbreite auf die Unsicherheiten bei der Umsetzung von batteriegegenüber wasserstoffelektrischen Antrieben zurückzuführen ist.

Häfen werden in Deutschland, falls ihre Stromversorgung teilweise durch Wasserstoff gedeckt werden kann, einen Wasserstoffbedarf von bis zu 1,3 TWh/a (40.000 Tonnen) haben. Bei Umsetzung vornehmlich im Bereich der Hafenumschlaggeräte liegt der Bedarf bei deutlich geringeren ca. 0,16 TWh (5.000 Tonnen pro Jahr).

Durch Schiffbau und Zulieferindustrie wird ein Bedarf von zwischen 0,26 und 0,4 TWh (8.000 bis 12.000 Tonnen) Wasserstoff pro Jahr entstehen.

Mittelfristig, bis um 2030, sind die Vorhersagen mit großen Unsicherheiten behaftet, eine aktive Einführung von Wasserstofftechnologien ist vor allem in den Bereichen Häfen und Binnenschifffahrt wahrscheinlich, wohingegen insbesondere in der Seeschifffahrt mit einem größeren Hochlauf erst nach 2030 zu rechnen ist.

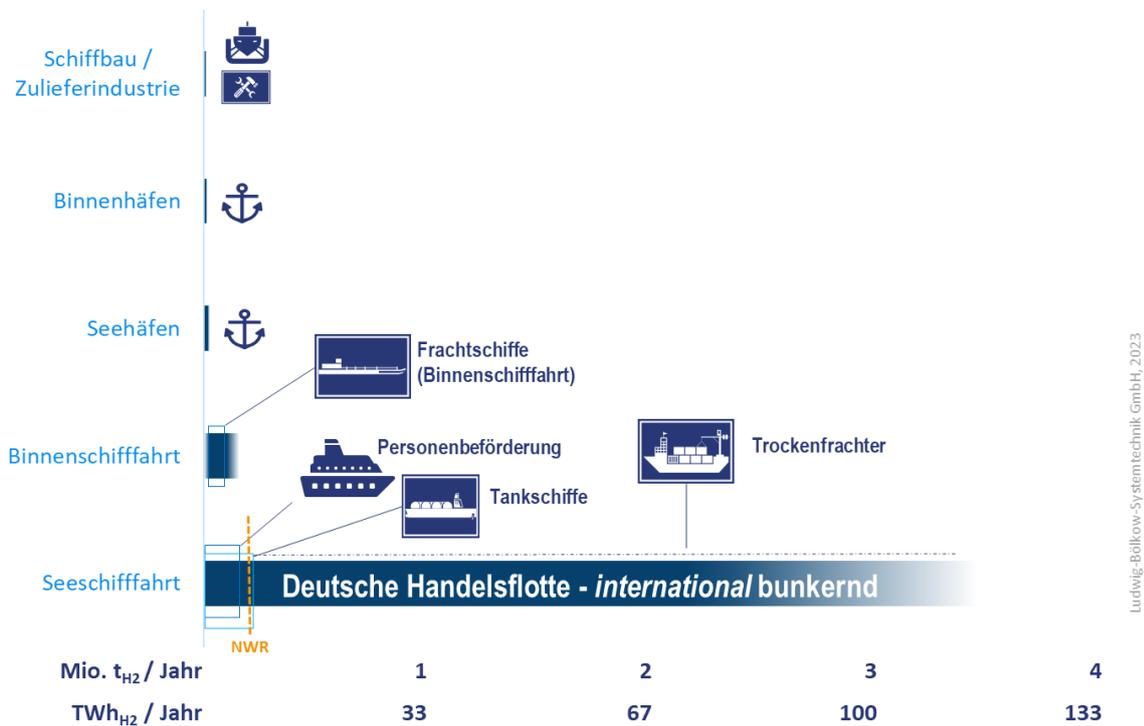


Abbildung 1: Zusammenfassung der abgeschätzten H₂-Bedarfe bzw. seiner Derivate der maritimen Teilbranchen bis 2045

Tabelle 1: Mögliche Wasserstoffbedarfe der maritimen Teilbranchen

Teilbranche	H ₂ -Bedarf in TWh pro Jahr	H ₂ -Bedarf in Mio. Tonnen pro Jahr
Seeschifffahrt	114	3,4
Binnenschifffahrt	3,8	0,12
Seehäfen	0,8	0,03
Binnenhäfen	0,5	0,02
Schiffbau und Zulieferer	0,4	0,01
Meerestechnik	~0	~0
Gesamt	119,5	3,58

Die deutsche maritime Industrie und deutsche Handelsflotte können den weltweiten Standard für erneuerbare Kraftstoffe und globalen Klimaschutz voranbringen

Die deutsche Handelsflotte besteht aus ca. 1.700 Seeschiffen; vorwiegend Containerschiffe, Stückgutfrachter, Mehrzweckfrachter und Mineralöltanker. Aufgrund ihrer weiten, interkontinentalen Fahrtrouten stellen sie ein großes Potenzial für den Einsatz erneuerbarer Kraftstoffe und damit zur Erlangung der Dekarbonisierung der Branche dar. Trockenfrachter fahren vor allem auf internationalen Routen und benötigen daher eine weltweite Infrastruktur. Mit einem Bedarf von über 100 TWh/a (3 Mio. Tonnen) Wasserstoff (bzw. seiner Derivate) bildet dieses Segment einen zentralen Hebel für die Nutzung von erneuerbarem Kraftstoff. International navigierende Tankschiffe haben einen potenziellen jährlichen Bedarf von ca. 7,7 TWh (230.000 Tonnen) Wasserstoff.

Keine andere Anwendung (Ausnahme Flugverkehr) hat eine vergleichbar hohe technische Anforderung an die Energie- und Leistungsdichte für die Energieversorgung wie die Hochseeschifffahrt und erfordert daher den Aufbau einer spezifischen, weltweiten Infrastruktur zur internationalen Bunkerung erneuerbarer Kraftstoffe.

Internationale Entwicklungen (v. a. Kraftstoffpreise/-verfügbarkeiten) sind entscheidende Parameter bei der Wahl der Kraftstoffe, insbesondere für die Betreiber von internationalen Routen. Innerhalb des maritimen Sektors hat die Seeschifffahrt mit Abstand die langfristige Perspektive bzw. den längsten Entwicklungshorizont hinsichtlich einer Einführung und Umstellung auf erneuerbare Kraftstoffe.

In der Seeschifffahrt wird der Einsatz von H₂-Derivaten und Verbrennungsmotoren favorisiert, insbesondere für Frachtschiffe mit langen Routen, um möglichst wenig Bunkerorte anlaufen zu müssen. Über den sogenannten „Dual-Fuel-Motoren-Ansatz“ erprobt die Branche bereits heute, in einer sogenannten „Übergangsphase“, (lokal bzw. temporär) Emissionsminderungen zu erreichen bzw. lokale regulatorische Vorgaben zu erfüllen und um Erfahrungen mit alternativen Kraftstoffen zu sammeln. Dieser Ansatz ist grundsätzlich mit mehr Aufwand und höheren Kosten gegenüber den herkömmlichen Kraftstoffen verbunden. Er ist dennoch sinnvoll, da sich so die Risiken reduzieren lassen, die mit einer technischen Umstellung, der (weltweiten) Verfügbarkeit der neuen Kraftstoffe und den erwartbaren Kostenentwicklungen der Kraftstoffe verbunden sein werden. Mittel- bis langfristig muss jedoch eine einheitliche und klare Strategie gefunden werden. Der Schiffbau und die Zulieferindustrie können hierzu mit der Entwicklung neuer Technologien und neuer Antriebssysteme einen entscheidenden Impuls für die Dekarbonisierung der Schifffahrt geben und beitragen.

Die deutsche Handelsflotte bunkert überwiegend international. Wenn sie auf einen einheitlichen erneuerbaren Kraftstoff umsteigen würde und die deutsche Industrie dazu Technologielösungen anbietet, könnte dies auch die Entwicklung eines internationalen Standards und den Aufbau einer weltweiten Infrastruktur voranbringen – insbesondere auch im Rahmen der internationalen Gremien- und Regelwerksarbeiten.

Für große Frachtschiffe mit langen Fahrtrouten, wie z. B. Containerschiffe, und von geschultem Personal werden insbesondere folgende erneuerbare Kraftstoffe favorisiert: Methanol (MeOH), Flüssigwasserstoff (LH₂) und auch Ammoniak (NH₃).

Eine Abstimmung der deutschen Akteure über eine gemeinsame Kraftstoffstrategie ist ein wichtiger und zentraler Schritt für die Einführung eines erneuerbaren Kraftstoffes. In enger Abstimmung mit der Politik (den Bundesländern und der Bundesregierung) sollte dazu eine gemeinsame Position Deutschlands für eine Kraftstoffstrategie für die internationalen Seeschiffe gefunden werden. Auf europäischer Ebene

sollten im Austausch mit den europäischen Nachbarn eine europäische Strategie und Roadmap gemeinsam ausgearbeitet und entwickelt werden, die in einem nächsten Schritt in internationalen Gremien von allen europäischen Delegierten gemeinsam eingebracht werden können.

Hier könnte das Deutsche Maritime Zentrum eine koordinierende Rolle einnehmen und den Prozess, beispielsweise über eine Koordinierungsplattform, u. a. mit der Industrie, den Reedereien, den Häfen, der Wissenschaft sowie der Politik verstetigen und voranbringen.

Die deutsche und europäische Kreuz- und Fährschifffahrt können gezielt den Wasserstoff-Infrastrukturausbau in Europa unterstützen und stärken

Kreuzfahrtschiffe, mit vielen Fahrgästen und touristischen Fahrtrouten, sowie Fähren stehen unter steigendem öffentlichen Druck zur Nachhaltigkeit. Sie unterliegen aufgrund des Personentransports sehr hohen sicherheitsrelevanten und genehmigungsrechtlichen Anforderungen. Dies ist insbesondere für die Wahl der erneuerbaren Kraftstoffe von hoher Relevanz. Beispielsweise ist die Nutzung von Ammoniak (NH₃) aufgrund der Gefährdungskategorie hier praktisch ausgeschlossen. Auch die Nutzung von Methanol (MeOH) weist gegenüber herkömmlichem Kraftstoff ein erhöhtes Gefährdungspotenzial für Menschen auf.

Für die heute 17 deutschen Kreuzfahrtschiffe wird langfristig ein Potenzial von ca. 3,3 TWh (100.000 Tonnen) Wasserstoff pro Jahr, für die weiteren 80 Personenschiffe eines von über 4,3 TWh (130.000 Tonnen) geschätzt. Für die knapp 1.300 Fähren und Fahrgastschiffe, die zumeist international, teilweise nur national verkehren, wird von einem Verbrauch von knapp 0,1 TWh (30.000 Tonnen) pro Jahr ausgegangen.

Für Fahrtrouten entlang der Küsten, z. B. in (Nord-)Europa könnten bei der Nutzung von Druckwasserstoff (CGH₂) Synergien mit beispielsweise dem Straßenverkehr genutzt bzw. erschlossen werden.

Heutige Haupt- und Hilfssysteme mit Verbrennungsmotoren könnten zukünftig auf Kreuzfahrtschiffen durch mit Wasserstoff versorgte modulare und skalierbare Brennstoffzellen (BZ) ersetzt werden.

Die Umrüstung der Fahrgast- / Personenschiffe in Europa bzw. entlang der Küsten auf Brennstoffzellensysteme sollte gezielt vorangebracht werden. Die Nutzung von Synergien beim Aufbau einer Logistik für Wasserstoff an den Küsten Europas (z. B. mit Straßenverkehr, Gasnetzen und Industriestandorten) eröffnet Verfügbarkeiten von weiteren Bunkeroptionen in Europa. Zusammen mit den Reedereien, den Werften und der Politik (Bundesland, Bund, EU) sollten dazu ein einheitliches Vorgehen und ein Zeitplan entwickelt werden.

In einer solchen Strategie sollten insbesondere die Rolle (als „First Mover“) und die Chancen für die Kreuzschifffahrt in und für Europa herausgearbeitet werden. Es müssen gezielt Synergien mit nationalen/europäischen Infrastrukturplanungen und H₂-Strategien erschlossen werden, u. a. über die europäische H₂-Strategie und die Rolle der europäischen Schifffahrt sowie den Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur in Europa.

Es wird empfohlen, dass Industrie, Häfen, die (norddeutschen) Länder, der Bund und die europäischen Nachbarn gemeinsam eine Strategie entwickeln, die in eine Versorgungsstrategie „grüner H₂ aus Offshore-Anlagen“ mündet.

Dies könnte beispielsweise unter der Koordination und Federführung des Deutschen Maritimen Zentrums erfolgen, das sowohl die maritimen Akteure als auch die politischen Vertretungen zu Abstimmungen und gemeinsamen Ausarbeitung von Strategien und Zielen zusammenbringen kann.

Mit der Entwicklung konkreter Zeitpläne bis 2030 und für 2030 bis 2045 sollten auch mögliche Beiträge aus Offshore-Anlagen in der Nordsee und der Ostsee gezielt mitgeplant werden. Darauf aufbauend können H₂-Mengen und Beiträge für den European Hydrogen Backbone⁴ und das deutsche Wasserstoffnetz⁵ aus maritimen Anwendungen abgeleitet und geplant werden.

Die Seehäfen in Deutschland und Europa können zu Energie-Hubs und damit zu zentralen Orten für die Bebungung und Verteilung erneuerbarer Kraftstoffe werden.

Binnenschiffe unterliegen lokalen Emissionsvorgaben und sind wichtiger Teil in regionalen Energiekonzepten und der Wasserstoff-Infrastrukturplanung

Neben der Elektrifizierung mit Batteriesystemen wird ein relevanter Teil der Binnenschiffe (v. a. Gütermotorschiffe, aber auch Fähren und größere Personenschiffe, insbesondere bei höheren Leistungsanforderungen) auf grünen Wasserstoff/Derivate umgestellt werden müssen, um die Dekarbonisierungsziele zu erreichen. Insgesamt wird für die knapp 2.900 Frachtschiffe, Bunkerboote, Schub- und Schubschleppboote langfristig ein Bedarf von knapp 2,8 TWh/a (85.000 Tonnen) Wasserstoff ermittelt. Bei Personenschiffen, inkl. Fähren und Fahrgastschiffen, gibt es ein Potenzial für die Nutzung von jährlich knapp 0,1 TWh (30.000 Tonnen) grünem Wasserstoff.

Für den Einsatz von Brennstoffzellen in der Binnenschifffahrt eröffnen sich aufgrund der Leistungsanforderungen Synergiepotenziale mit der Entwicklung und Markteinführung von Brennstoffzellen, stationärer Blockheizkraftwerke (BHKW) sowie Lkw, Bussen und Zügen. Für 2026 ist eine breite Markteinführung einer neuen Brennstoffzellentechnologie-Plattform für Nutzfahrzeuge geplant. Brennstoffzellen bieten eine skalierbare Option für Nullemissionsantriebe für kommerzielle Personen- und Frachtbinnenschifffahrt mit verschiedenen Alternativkraftstoffen.

Die langen Nutzungszyklen von Binnenschiffen erfordern eine frühe Einführung dauerhaft robuster Kraftstoff- und Antriebsoptionen (andernfalls besteht Strukturbruchrisiko). Neben Methanol (MeOH) wird hier vor allem Wasserstoff als Option betrachtet. Der Vorteil: Wasserstoff eröffnet Synergien beim Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur (insbesondere Druckwasserstoff – CGH₂) für Binnenschiffe. Jedoch erfordert die geringe H₂-Speicherichte (volumetrisch) eine angepasste Bunkerlogistik und -strategie. Für eine optimierte Integration von CGH₂-Tanks in Binnenschiffen wird meist ein Neubau als „Future-Fuel-Ready“ (innovative Konzepte) gegenüber einem Retrofit (Integration in bestehendes Schiffsdesign, optimiert für Diesel und Verbrennungsmotor) präferiert.

Bei einer gezielten Entwicklung einer Dekarbonisierungsstrategie für die deutsche Binnenschifffahrt sollte deshalb die Umstellung auf Brennstoffzellenantriebe und die Nutzung von Wasserstoff geprüft und untersucht werden, beispielsweise im Rahmen einer spezifischen Machbarkeitsstudie in enger Einbindung der maritimen Industrie, Reedereien und Häfen. Dabei sollten die Synergien identifiziert und berücksichtigt werden, die eine Logistik und Infrastrukturplanung für CGH₂ in Abstimmung mit dem Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur im Straßenverkehr, der regionalen H₂-Strategien und vor allem der Häfen ergeben. Es wird empfohlen, spezifische Bunkerinfrastrukturen für Binnenschiffe mit Druckwasserstoff zu entwickeln, z. B. im Rahmen einer bundesweiten Untersuchung sowie im Rahmen von regionalen H₂-

⁴ Siehe: <https://ehb.eu/>, zuletzt abgerufen am 19.07.2023.

⁵ Siehe: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/07/20230712-planungsstand-deutschlandweites-wasserstoff-kernetzes-fuer-kuenftige-wasserstoff-infrastruktur.html>, zuletzt abgerufen am 19.07.2023.

Konzepten. Dazu sollten auch bei der weiteren Planung und dem Aufbau der Infrastruktur von Druckwasserstoff-Tankstellen gezielt Binnenseen, Flüsse und die Küstenregion mit eingeplant und geprüft werden.

Die meisten Binnenschiffe werden voraussichtlich nicht durch neue Schiffe (z. B. mit Neudesign) ersetzt werden, sondern aufgrund des langen Nutzungszeitraums nachgerüstet werden müssen (Retrofit). Für diese Schiffe sollten robuste Bunkerstrategien bzw. Bebunkerungsanlagen an den Flüssen (v. a. Rhein), Seen (z. B. Müritz, Bodensee) und Küstenregionen angepasst und bereitgestellt werden.

Häfen – Säulen und Energie-Hubs der Energiewende

Häfen sind attraktive Orte, um neue Infrastrukturen für grünen H₂ und seine Derivate aufzubauen. Häfen können als sogenannte „grüne Energie-Hubs“ die Energiewende in Deutschland und international voranbringen sowie ein Treiber für die Weiterentwicklung und Umstellung der Energieinfrastruktur sein. In vielen Häfen laufen dazu bereits Untersuchungen, Demonstrationsprojekte, Pilotvorhaben und Planungen. Aktuell wird eine nationale Hafenstrategie⁶ entwickelt, die eine Grundlage für die weiteren Detaillierungen ab 2024 darstellen kann.

Häfen sind Umschlagplatz von Waren und Gütern, Logistikstandort mit Anbindung zum Straßen- und Schienenverkehr wie auch zu den Binnengewässern. Erneuerbare Kraftstoffe könnten hier nach Deutschland importiert und auch See- sowie Binnenschiffe bebunkert werden.

Im Hafen selbst benötigen die Umschlaggeräte aktuell die meisten Kraftstoffe und werden langfristig bis zu 0,2 TWh/a (5.000 Tonnen) Wasserstoff verbrauchen. Weitere Energiebedarfe ergeben sich durch Immobilien zur Strom- und Wärmeversorgung, dazu betreiben typischerweise Häfen auch lokale erdgasversorgte BHKW. Der steigende Bedarf an Strom (u. a. Landstromversorgung, Kühlleistung von Containern usw.) stellt die Häfen vor Herausforderungen, sie müssen ihre Energieversorgung optimieren und auf emissionsarme Kraftstoffe umstellen. Bei Umsetzung von Wasserstofflösungen auch in diesem Bereich (beispielsweise zur Abfederung von Verbrauchsspitzen) können insgesamt bis zu 0,8 TWh/a (25.000 Tonnen) Wasserstoff in den Seehäfen und einen Bedarf von ca. 0,5 TWh/a (16.000 Tonnen) in den Binnenhäfen benötigt werden.

Durch Wasserstoff (bzw. seine Derivate) ergeben sich Möglichkeiten auch für neue bzw. erweiterte Geschäftsfelder. So sind z. B. die Standorte für den Import von Wasserstoff/Derivaten noch nicht vorhanden bzw. festgelegt. Auch die Lagerung und die Distribution (z. B. auf den deutschen Wasserstraßen) und an Import-Standorten (Häfen) sind bisher nicht geplant. Häfen haben die Chance, vom Energieverbraucher zum Energiedienstleister zu werden. Auch das Bunkern erneuerbarer Kraftstoffe birgt Potenzial für sie, insbesondere in Bezug auf eine potenziell steigende Nachfrage in (Nord-)Europa bei einer Umstellung der Schifffahrt (insbesondere von Personenschiffen und Fähren) auf Druckwasserstoff.

Es wird empfohlen, gezielt die Entwicklung ganzheitlicher Konzepte zur Transformation der Häfen zu „Energie-Hubs der Energiewende“ voranzubringen (z. B. in einzelnen Bundesländern und ihren Standorten oder in einer erweiterten Perspektive in einer Untersuchung des Bundes). Neben dem Import von Energie sollten hier insbesondere die Synergie bei der Umrüstung der Umschlaggeräte, der Anbindung der Logistik (Schiene, Straße, Binnenschifffahrt), der lokalen/regionalen Strom- und Wärmeerzeugung und die

⁶ Siehe: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Video/YouTube/einspielfilm-hafenstrategie.html>, zuletzt abgerufen am 18.07.2023.

mögliche Rolle der Häfen zur Sicherung der Energieversorgung (u. a. Netzstabilität durch Brennstoffzellen-Anlagen) herausgearbeitet werden.

Schiffbau und Zulieferindustrie können sich mit ihrem „Know-how“ weltweit die Technologieführerschaft sichern

Im Schiffbau eröffnen Wasserstoff, wie auch H₂-Derivate, für Umschlaggeräte und in der Logistik Chancen für die Substitution von fossilen Kraftstoffen. Zudem wird Wasserstoff weiterhin in existierenden Spezialanwendungen (z. B. Hydridspeicherherstellung) Anwendung finden. Ein größeres Potenzial bietet der Erdgasersatz durch grünen Wasserstoff, z. B. in den Werften für die stationäre Energieerzeugung in Blockheizkraftwerken (BZ oder Turbine). Mittel- bis langfristig bietet die Umsetzung von kombinierter Strom- und Wärmeerzeugung mit Wasserstoff Synergiepotenziale, insbesondere für Werften mit großem Wärmebedarf (Großhallen).

Die Zulieferer werden Wasserstoff aktiv und bereits mittelfristig einsetzen. Langfristig ist für den Schiffbau und die Zulieferer ein Bedarf von insgesamt ca. 0,3 TWh (10.000 Tonnen) H₂ pro Jahr zu erwarten – ca. 0,1 TWh/a (4.000 Tonnen) davon durch die Schiffbaubetriebe selbst. Auch wenn H₂ für die Dekarbonisierungsstrategien im Schiffbau und in der Zulieferindustrie keine große Rolle spielt, wird der Umbau der maritimen Branche nur mit dem Know-how zu Antriebs- und Energieerzeugung und Hilfssystemen möglich sein. Neben dem Neubau und Re-Design von Schiffen für eine optimale Auslegung und Integration erneuerbarer Antriebssysteme müssen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten zahlreiche Bestandsschiffe umgerüstet werden.

Meerestechnik stellt Offshore-Technik zur grünen Kraftstofferzeugung: Große Mengen Wasserstoff können zunehmend auf dem Meer direkt erzeugt werden und erfordern u. a. Wartung, Steuerung, Sicherheit und zuverlässige Infrastruktur

In der Meerestechnik sind Potenziale für wasserstoffbasierte Energieversorgung zur dezentralen und modularen Stromversorgung von Kleinanwendungen (z. B. Hindernisfeuer, autonome Mess- und Steuergeräte, Kommunikationssysteme) identifiziert worden. Da durch den Forschungsschwerpunkt die Wirtschaftlichkeit nicht immer im Vordergrund steht, ist über Einzelanwendungen hinaus kein relevanter „Massenmarkt“ zu erwarten. Somit ist kurz- bis mittelfristig von keinen signifikanten Wasserstoffbedarfen auszugehen. Auch langfristig ist der Verbrauch von Wasserstoff direkt auf See eher unwahrscheinlich, auch wenn über mögliche PtX-Anlagen⁷ diskutiert wird. Die größte Rolle wird in jedem Fall die Offshore-Erzeugung von Wasserstoff spielen, die gleichzeitig Potenziale für Wartungstechnik sowie Monitoring, Steuerungs- und Sicherheitstechnik schaffen wird.

Maritime Branche schafft Energiewende

- Heute wie in Zukunft: Die Seefahrt ist ein wichtiger und zentraler Hebel der Versorgung mit Gütern (heute werden ca. 90 % der Waren über den Seeweg transportiert).
- Für die Umstellung auf erneuerbare Energien werden auch zunehmend Energieimporte über die Seewege stattfinden, erneuerbare Energien aus Offshore-Anlagen bereitgestellt und damit wird Norddeutschland eine zunehmend wichtige Rolle in der Energiewende einnehmen.

⁷ PtX – Power to X, mit X als Variable für die Erzeugung von H₂/Derivaten aus erneuerbarem Strom.

- Die Seefahrt benötigt und bietet einen internationalen Lösungsansatz zur erfolgreichen Dekarbonisierung. Die deutsche maritime Branche kann hier auch über den großen Hebel ihrer Handelsflotte weltweit vorangehen, Allianzen suchen und international Standards setzen.
- An der Küste Deutschlands und vor allem in Nordeuropa sollten gezielt Synergien für einen Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur und Logistik im Straßenverkehr und auch der Gasinfrastruktur genutzt werden. Insbesondere Personenschiffe und Fähren bieten hier ein Potenzial zum Ausbau einer Druckwasserstoff-Infrastruktur an der Nordsee und der Ostsee/Baltischen See.
- Seehäfen können und sollten zügig zu Energie-Hubs für erneuerbare Kraftstoffe umgebaut und positioniert werden. Gemeinsam mit den Binnenhäfen können sie die regionale Entwicklung der grünen Wasserstoffnutzung und -bereitstellung vorantreiben. Neben Umschlaggeräten sind vor allem Logistikbereiche (Rangierfahrten und Lkw) Anwendungsbereiche für die Umstellung auf Wasserstoff.
- Die Binnenschifffahrt kann vor allem von Technologieentwicklungen im Bereich der Brennstoffzellen für Lkw profitieren und auch den Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur nutzen.
- Die Dekarbonisierung der Schifffahrt durch Wasserstoff und seine Derivate birgt ein hohes Potenzial zur Wertschöpfung innerhalb Deutschlands. Es können eine Neuausrichtung und Spezialisierung der Werften und Zulieferindustrie durch Fokussierung auf Brennstoffzellenantriebe mit Wasserstoff-Konzepten und Methanol für Binnenschiffe, Fähren und Personenschiffe durch den Aufbau und die Nutzung von Know-how und eine Vertiefung der Wertschöpfungskette erreicht werden. In Abstimmung mit der Industrie, den Schiffsbetreibern, den Häfen und der Politik sollen gezielt und frühzeitig spezifische Produkte im Markt positioniert werden und die deutsche Schiffbaubranche eine Vorreiterrolle übernehmen, Erfahrung in Projekten sammeln und so in den frühen 30er-Jahren vom erwarteten Hochlauf der erneuerbaren Antriebe profitieren.
- Die Meerestechnik kann wertvolle Beiträge für den Ausbau der Offshore-Technik hin zu grüner Kraftstofferzeugung leisten. Große Mengen Wasserstoff können auf dem Meer direkt erzeugt werden. Dafür muss Infrastruktur aufgebaut und gewartet werden (über und unter der Meeresoberfläche). Der Bau und die Wartung von Energieerzeugungsanlagen in der Nord- und Ostsee (u. a. Offshore-Anlagen, künstliche Inseln, Pipelines etc.) bieten hier neue Einsatzbereiche für die Meerestechnik. Wichtig sind dabei die Erforschung und Umsetzung der Anforderungen an Sicherheit, Überwachung, Monitoring und Steuerung von Anlagen (u. a. autonome Systeme, Fahrzeuge, Anlagen). Die Entwicklung einer abgestimmten Strategie von Anbietern von Meerestechnik und Entwicklern der (Offshore-) Wasserstoff-Infrastruktur wird empfohlen, z. B. mit dem DMZ als Ankerpunkt zwischen Offshore-Anbietern und anderen Sektoren.

All diese Prozesse benötigen eine kontinuierliche Koordination und Moderation

Es wird empfohlen, dass das Deutsche Maritime Zentrum den weiteren Austausch innerhalb der Teilbranchen, wie auch über die ganze maritime Branche, mit der Industrie, den Reedereien, den Häfen, der Wissenschaft, den Verbänden und den politischen Institutionen (Bundesländer, Bund und Europa) weiterführt und begleitet. Hierzu könnte eine Koordinierungsplattform den passenden Rahmen geben und auch den Austausch zwischen den maritimen Teilbranchen mit den weiteren Sektoren und Akteuren der Energiewende unterstützen. Die maritime Branche kann hier wie kaum ein anderer Sektor entscheidende Rahmenbedingungen für die Energiewende schaffen – nicht nur in und für Deutschland, sondern international.

EXECUTIVE SUMMARY

Background and motivation

On behalf of the German Maritime Center (DMZ)⁸, this study examines the possible and future role of green hydrogen and its derivatives (e. g. methanol, ammonia) in the maritime sub-sectors of shipping, ports, shipbuilding and suppliers, and marine technology. In addition to potential renewable fuel demands, synergies with among sectors will be identified and recommendations derived.

There is a need for a common understanding of the possible solutions, the potential hydrogen requirements and the relevant applications within the maritime sub-sectors.

The maritime sector - like society as a whole - is under pressure to develop and demonstrate concepts and strategies for decarbonization. In particular, renewable hydrogen applications (and those of its derivatives) offer a promising path to successful emission reduction.

Based on robust estimates of possible technology developments, specific development scenarios up to the year 2045, expert interviews and literature evaluations, this study creates an initial basis for further strategy, concept and implementation planning for the maritime industry.

Approach and structure of this study

The study highlights prospects for the short- (by 2025), medium- (by 2030), and long-term (by 2045) application of renewable hydrogen (and its derivatives). Basically, different renewable fuels generated from green electricity (e-) are considered:

- Compressed hydrogen (e-CGH₂) with 35-70 MPa
- Liquid hydrogen (e-LH₂)
- Methanol (e-MeOH)
- Ammonia (e-NH₃)
- Liquefied natural gas (e-LNG)
- Diesel (e-Diesel)

Through all chapters this study is structured in such a way that it is possible to differentiate between the various sub-sectors at any time.

Chapters on shipping cover both inland navigation and ocean shipping, but not fishing and military shipping. Statistics from the Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH)⁹ and the Federal Waterways and Shipping Administration (WSV)¹⁰ serve as the main data basis.

The German merchant fleet operates internationally and does not exclusively bunker in Germany. Therefore, this study does not only determine the demand for hydrogen in Germany (which is also generated by international shipowners), but also considers and discusses the future international demand generated by German shipowners.

⁸ www.dmz-maritim.de, last visited 14.07.2023.

⁹ www.bsh.de, last visited 14.07.2023.

¹⁰ www.gdws.wsv.bund.de, last visited 14.07.2023.

Chapters on ports include both inland and seaports. The study includes the terminals, as well as the surrounding infrastructure, but no local industry.

Chapters on shipbuilding and its supply industry consider in principle all types of shipyards in Germany, the supply industry is considered without service providers (“Dienstleister”) and essentially covers the companies from steel production, metal processing and mechanical engineering.

The chapters on marine technology consider a very heterogeneous consumption structure and, due to the (still relatively) small offshore industry in Germany, mainly cover small-scale applications and subsea technology. Aquaculture and fishing are also excluded here.

In order to identify and finally quantify potential hydrogen applications, the first step was to:

Analyzes the energy-consuming processes for all subsectors in **chapter 1** and whether and how hydrogen solutions can cover them.

In **chapter 2**, the technical maturity of each sector was classified (Technology Readiness Level - TRL) and a perspective of feasibility was developed.

In **chapter 3**, methods for extrapolation and specific scenarios for hydrogen applications in the maritime subsectors were developed using the most robust data basis and the technical assessments.

Finally, **chapter 4** extrapolates the potential hydrogen demand and derivatives for each sub-sector and provides an initial assessment against context of the results.

Chapter 5 summarizes the results and key findings and derives conclusions and recommendations for the respective maritime sub-sectors.

Summary of key findings and recommendations

For the overall maritime industry, an annual demand of more than > 119 TWh (> 3.5 million tons) of hydrogen or derivatives is expected in the long term (see Figure 1 and Table 1). According to the current distribution of energy demand, shipping - and international ocean shipping in particular - dominates with about 95 % share. International ocean shipping alone reaches about 114 TWh (3.4 million tons) per year. Most of this demand is expected to occur in the long term. Additionally, it must be taken into account that this demand is generated by the merchant fleet worldwide. Estimates by the “Nationaler Wasserstoffrat” (NWR) were significantly lower for the shipping sub-sector at up to 0.08 million tons (by 2030) and about 0.25 million tons per year in the long term (2040-2050), but did not consider the complete German merchant fleet, only the projected demand from German ships in German ports.

Inland and coastal shipping generates a demand of between 1 - 3.8 TWh (30,000 to 115,000 tons) of hydrogen per year, with the wide range due to uncertainties in the implementation of battery versus hydrogen electric propulsion.

Ports in Germany, if their power supply can be partially met by hydrogen, will have a hydrogen demand of up to 1.3 TWh/a (40,000 tons). If implemented primarily in port handling equipment, the demand will be much lower at about 0.16 TWh (5,000 tons per year).

Shipbuilding and supply industries will generate a demand of between 0.26 - 0.4 TWh (8,000 to 12,000 tons) of hydrogen per year.

In the medium term, until around 2030, the forecasts are subject to major uncertainties. An (pro)active introduction of hydrogen technologies are more likely in the ports and inland navigation sectors. For ocean shipping a major ramp-up is expected after 2030.

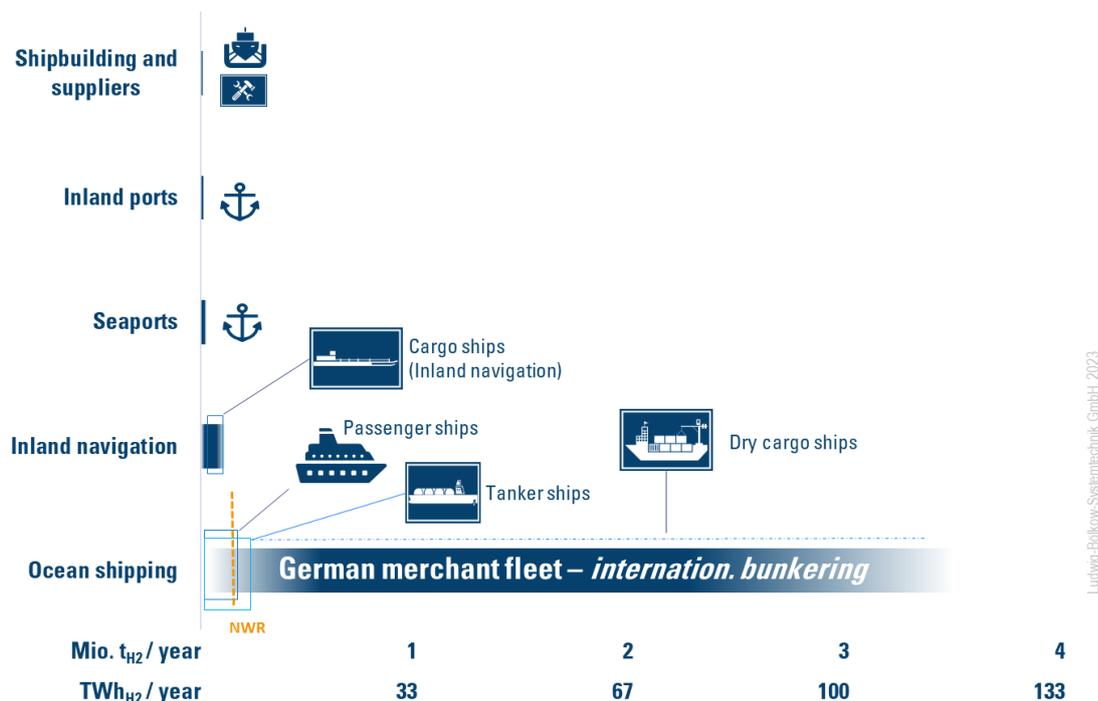


Abbildung 2: Summary of potential H₂ demands and derivatives until 2045

Tabelle 2: Potential H₂ demand throughout the maritime sub-sectors

Sub-sector	H ₂ demand in TWh per year	H ₂ demand in Mio. tons per year
Ocean shipping	114	3.4
Inland navigation	3.8	0.12
Seaports	0.8	0.03
Inland ports	0.5	0.02
Shipbuilding and suppliers	0.4	0.01
Marine Technology	~0	~0
Overall	119.5	3.58

The German maritime industry and German merchant fleet can advance the global standard for renewable fuels and global climate protection

The German merchant fleet consists of approximately 1,700 seagoing vessels; mainly container ships, general cargo ships, multipurpose freighters and mineral oil tankers. Due to their long, intercontinental routes, they represent a great potential for the use of renewable fuels and thus for achieving decarbonization of the industry. Dry cargo vessels primarily travel on international routes and therefore require global infrastructure. With a demand of over 100 TWh/a (3 Mio. tons) of hydrogen (or its derivatives),

this segment is a key lever for the use of renewable fuels. Internationally navigating tankers have a potential annual demand of about 7.7 TWh (230,000 tons) of hydrogen.

No other application (with the exception of aviation) has a comparably high technical requirement for energy and power density for energy supply as ocean shipping and therefore requires the development of a specific, worldwide infrastructure for international bunkering of renewable fuels.

International developments (i.e., fuel prices / availability) are crucial parameters in the choice of fuels, especially for operators of international routes. Within the maritime sector, ocean shipping has by far the longest perspective or development horizon in terms of introduction and conversion to renewable fuels.

In ocean shipping, the use of H₂ derivatives and combustion engines is favored, especially for cargo ships with long routes, to minimize bunker stops as far as possible. The industry is already testing the so-called "dual fuel engine approach" in a so-called "transition phase" to achieve (local or temporary) emission reductions or to meet local regulatory requirements and to gain experience with alternative fuels. In principle, this approach involves more effort and higher costs compared to conventional fuels. It is nevertheless sensible, as it reduces the risks that will be associated with the technical adaptation, the (global) availability of new fuels and the expected cost developments of these fuels. In the medium to long term, however, a uniform and clear strategy "without further transition solutions" must be found. Shipbuilding and the supply industry can provide a decisive impulse for and contribute to the decarbonization of shipping by developing new technology solutions and new propulsion systems in particular.

The German merchant fleet mainly bunkers internationally. If it were to switch to a uniform renewable fuel and German industry were to offer technology solutions for this purpose, this could also promote the development of an international standard and the establishment of a global infrastructure - especially in the context of international committee and regulatory work.

For large cargo ships with long routes, such as container ships, and trained personnel, the following renewable fuels are particularly favored: methanol (MeOH), liquid hydrogen (LH₂) and also ammonia (NH₃).

A coordination of the German stakeholders on a common fuel strategy is an important and central step for the introduction of a renewable fuel. For this purpose, a common position of Germany for a fuel strategy for international seagoing vessels should be found in close coordination with the political community (the federal states and the federal government). On the European level, a European strategy and roadmap should be jointly elaborated and developed in exchange with the European neighbors, which in a next step can be introduced in international bodies by all European representatives.

Here, the German Maritime Center (DMZ) could take on a coordinating role and consolidate and advance the process, for example via a coordination platform with industry, shipping companies, ports, science and politics, among others.

German and European cruise shipping and ferries can specifically support and strengthen H₂ infrastructure development in Europe

Cruise ships, with many passengers and tourist routes, as well as ferries are under increasing public pressure for sustainability adaptations. Due to the transport of passengers, they are subject to very high safety-related certification requirements. This is particularly relevant for the choice of renewable fuels. For

example, the use of ammonia (NH₃) is practically ruled out here due to the hazard class. The use of methanol (MeOH) also has an increased hazard potential for humans compared to conventional fuel.

For today's 17 German cruise ships, a potential of approx. 3.3 TWh (100,000 tons) of hydrogen per year is estimated in the long term. For the additional 80 passenger ships over 4.3 TWh/a (130,000 tons). For the nearly 1,300 ferries and passenger ships, most of which operate internationally, some only nationally, consumption is assumed to be just under 0.1 TWh (30,000 metric tons) per year.

For routes along the coasts, e. g. in (Northern) Europe, synergies with road traffic could be exploited or developed especially in the context of compressed hydrogen (CGH₂) applications.

Today's main and auxiliary systems with combustion engines could be replaced in the future on cruise ships by modular and scalable fuel cells (FC) supplied with hydrogen.

The conversion of passenger ships along the coasts to fuel cell systems should be advanced in a targeted manner. The use of synergies in the development of logistics for hydrogen along the coasts of Europe (e. g. with road transport, gas networks and industrial sites) opens up availabilities of further bunker options. Together with the shipping companies, the shipyards and politics (federal state, federal government, EU), a uniform approach and a time schedule should be developed for this purpose.

In such a strategy, the role (as a "first mover") and the opportunities for cruise shipping in and for Europe should be worked out. Synergies with national / European infrastructure planning and H₂ strategies should be identified, including the European H₂ strategy and the role of European shipping, as well as the development of a hydrogen infrastructure in Europe.

It is recommended that industry, ports, the (northern German) states, the federal government, and European neighbors jointly develop a strategy that leads to a supply strategy "green H₂ from offshore plants".

This could be done, for example, under the coordination and leadership of the German Maritime Center, which can bring together both maritime stakeholders and political representatives for coordination and joint development of strategies and goals.

With the development of concrete timelines until 2030 and for 2030 to 2045, possible contributions from offshore plants in the North Sea and the Baltic Sea should also be specifically included in the planning. Based on this, H₂ quantities and contributions for the European Hydrogen Backbone¹¹ and the German hydrogen network¹² can be derived and planned for.

The seaports in Germany and Europe can become energy hubs and thus central locations for the bunkering and distribution of renewable fuels.

Inland vessels are subject to local emission regulations and are an important part of regional energy concepts and H₂ infrastructure planning.

In addition to electrification with battery systems, a relevant part of the inland vessels (mainly freight motor ships, but also ferries and larger passenger ships, especially with higher power requirements) will have to be converted to green hydrogen / derivatives in order to achieve the decarbonization targets. Overall, a

¹¹ <https://ehb.eu/>, last visited 19.07.2023.

¹² <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/07/20230712-planungsstand-deutschlandweites-wasserstoff-kernetzes-fuer-kuenftige-wasserstoff-infrastruktur.html>, last visited 19.07.2023.

long-term demand of just under 2.8 TWh/a (85,000 tons) of hydrogen is estimated for the nearly 2,900 cargo ships, bunker boats, push boats, and pusher tugs. For passenger ships, including ferries and passenger ships, there is a potential for the use of just under 0.1 TWh (30,000 tons) of green hydrogen annually.

For the use of fuel cells in inland navigation the development and market launch of fuel cells for stationary combined heat and power plants (CHP), trucks, buses and trains offer synergies. A broad market launch of a new fuel cell technology platform for commercial vehicles is planned for 2026. Fuel cells offer a scalable option for zero-emission propulsion for commercial passenger and cargo inland waterways using various alternative fuels.

The long service life of inland vessels requires early introduction of durable robust fuel and propulsion options (otherwise there is risk of structural failure).

Beside the use of methanol (MeOH), hydrogen in particular is considered as an option for inland vessels. The advantage: Hydrogen opens up synergies in the development of an H₂ infrastructure (especially compressed hydrogen - CGH₂). However, the low H₂ storage density (volumetric) requires an adapted bunker logistics strategy. For an optimized integration of CGH₂ tanks in inland vessels, a new construction as "Future-Fuel-Ready" (innovative concepts) is mostly preferred over a retrofit (integration into existing vessel design, optimized for diesel and combustion engine).

For a specific development of a decarbonization strategy for German inland navigation, the conversion to fuel cell propulsion systems and the use of hydrogen should therefore be examined and investigated, for example as part of a specific feasibility study in close involvement with the maritime industry, shipping companies and ports. This should identify and consider the synergies of logistics and infrastructure planning for CGH₂ in coordination with the development of H₂ infrastructure in road transport, regional H₂ strategies, and especially ports. It is recommended to develop specific bunkering infrastructures for inland vessels with pressurized hydrogen, e. g. in the context of a nationwide study as well as in the context of regional H₂ concepts. For this purpose, inland lakes, rivers and the coastal region should also be specifically included and examined in the further planning and development of the infrastructure of pressurized hydrogen refueling stations.

Most inland vessels will probably not be replaced by new vessels (e. g., with new design), but will have to be retrofitted due to the long period of use. For these vessels, robust bunkering strategies or refueling facilities should be adapted and provided at the rivers (especially at the river Rhine), lakes (e. g. Müritzer See, Lake Constance) and coastal regions.

Ports - pillars and energy hubs of the energy transition

Ports are attractive places to build new infrastructures for green H₂ and its derivatives. As so-called "green energy hubs" ports can advance the energy transition in Germany and internationally, as well as be a driver for the further development and conversion of the energy infrastructure. In many ports, studies, demonstration and pilot projects and planning are already underway. A national port strategy¹³ is currently being developed, which can form the basis for further details from 2024 onwards.

¹³ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Video/YouTube/einspielfilm-hafenstrategie.html>, last visited 18.07.2023.

Ports are transshipment points for goods and commodities, logistics locations with links to road and rail transport as well as inland waterways. Renewable fuels could be imported to Germany here and could also be bunkered for seagoing and inland vessels.

In the port itself, handling equipment currently requires the most fuel and will consume up to 0.2 TWh/a (5,000 tons) of hydrogen in the long term. Further energy requirements arise from real estate for power and heat supply, for which ports typically also operate local natural gas-supplied CHP units. The increasing demand for electricity (including shore-side electricity, container cooling capacity, etc.) poses challenges for ports, which must optimize their energy supply and switch to low-emission fuels. If hydrogen solutions are also implemented in this area (for example, to mitigate peak load), a total of up to 0.8 TWh/a (25,000 tons) of hydrogen may be required in the seaports and a demand of approx. 0.5 TWh/a (16,000 tons) in the inland ports.

Hydrogen (or its derivatives) also opens up opportunities for new or expanded business areas. For example, the locations for the import of hydrogen / derivatives are not yet available or defined. Also, storage and distribution (e. g. on German waterways) and at import locations (ports) are not planned yet. Ports have an opportunity to move from energy consumers to energy service providers. Bunkering of renewable fuels also holds potential for them, especially with respect to a potentially increasing demand in (Northern) Europe in case of a conversion of shipping (especially passenger ships and ferries) to pressurized hydrogen.

It is recommended to specifically advance the development of holistic concepts for the transformation of ports into "energy hubs of the energy transition" (e. g. in individual federal states and their locations or in a broader perspective in a federal government study). In addition to the import of energy, in particular the synergy in the conversion of handling equipment, the connection of logistics (rail, road, inland waterways), local / regional electricity and heat generation and the possible role of the ports in securing the energy supply (including grid stability through fuel cell plants) should be worked out.

Shipbuilding and supply industry can use their "know-how" to secure technological leadership worldwide

In shipbuilding, hydrogen, as well as H₂ derivatives, open up opportunities for the substitution of fossil fuels for handling equipment and in logistics. In addition, hydrogen will continue to be used in existing applications (e. g. hydride storage manufacturing). Greater potential is offered by natural gas substitution with green hydrogen, e. g., in shipyards for stationary power generation in cogeneration units (FC or turbine). In the medium to long term, the implementation of combined power and heat generation with hydrogen offers synergy potential, especially for shipyards with large heat requirements (large halls).

Suppliers will use hydrogen actively and already in the medium term. In the long term, shipbuilding and suppliers are expected to require a total of about 0.3 TWh (10,000 tons) of H₂ per year - about 0.1 TWh/a (4,000 tons) of this by the shipbuilding companies themselves. Even if H₂ does not play a major role for decarbonization strategies in the shipbuilding and supply industry, the transformation of the maritime industry will only be possible with the know-how on propulsion, power generation and auxiliary systems. In addition to the new construction and re-design of ships for an optimal design and integration of renewable propulsion systems, numerous existing ships will have to be converted in the coming years and decades.

Marine technology provides offshore technology for green fuel production: Large quantities of hydrogen can increasingly be produced directly at sea, requiring regular maintenance to ensure a safe and reliable infrastructure

In marine technology, potentials for hydrogen-based energy supply for decentralized and modular power supply of small applications (e.g. obstruction lights, autonomous measuring and control devices, communication systems) have been identified. Since the focus of research does not always put economic efficiency in the foreground, no relevant "mass market" is to be expected beyond individual applications. Thus, no significant hydrogen demand can be assumed in the short to medium term. Even in the long term, the consumption of hydrogen directly at sea is rather unlikely, even though possible PtX plants¹⁴ are being discussed. In any case, the greatest role will be played by the offshore production of hydrogen, which will at the same time create potential for maintenance technology as well as monitoring, control and safety technology.

Maritime sector influences and enables the energy transition

- Today as in the future - maritime transport is an important and central lever of the supply of goods to Germany (today about 90% of goods are transported by sea).
- For the switch to renewable energies, energy imports will also increasingly take place via sea routes, renewable energies will be provided from offshore plants and thus northern Germany will play an increasingly important role in the energy transition.
- Ocean shipping needs and offers an international solution for successful decarbonization. The German maritime sector can also use the great leverage of its merchant fleet to lead the way worldwide, seek alliances and set international standards.
- On the coast of Germany and especially in Northern Europe, synergies should be used specifically for the development of a hydrogen infrastructure and logistics in road transport and also the gas infrastructure. Passenger ships and ferries in particular offer potential for the expansion of a pressurized hydrogen infrastructure in the North and the Baltic Sea.
- Seaports can and should be rapidly converted and positioned as energy hubs for renewable fuels. Together with inland ports, they can drive the regional development of green hydrogen use and supply. In addition to transshipment equipment, logistics areas (shunting and trucks) are the main areas of application for the conversion to hydrogen.
- Inland navigation can benefit from technology developments in fuel cells for trucks and also from the development of the hydrogen infrastructure.
- The decarbonization of shipping through hydrogen and its derivatives holds a high potential for creating and expanding the value chain in Germany. A reorientation and specialization of the shipyards and supplier industry can be achieved by focusing on fuel cell propulsion systems with hydrogen concepts and methanol for inland waterway vessels, ferries and passenger ships. In coordination with industry, ship operators, ports and politics, specific products are to be positioned on the market in a targeted

¹⁴ PtX – Power to X, with X as variable for the generation of H₂ / derivatives from renewable electricity.

manner and at an early stage, and the German shipbuilding industry is to take on a pioneering role, gain experience in projects and thus benefit from the expected ramp-up of renewable drives in the early 30s.

- Marine technologies can make valuable contributions to the expansion of offshore production of green fuels. Large quantities of hydrogen can be produced directly at sea. This requires infrastructure to be built and maintained (above and below the sea surface). The construction and maintenance of energy production facilities in the North and Baltic Sea (including offshore facilities, artificial islands, pipelines) offer new areas of application for marine technology. This is important to further advance research and implement the requirements for safety, monitoring and control of facilities (including autonomous systems, vehicles and even plants). The development of a coordinated strategy of marine technology providers and developers of (offshore) hydrogen infrastructure is recommended, e. g. with the DMZ as an anchor point between offshore developers and other sectors.

All these processes require continuous coordination and moderation

It is recommended that the German Maritime Center (DMZ) continues and coordinates the further exchange within the sub-sectors, as well as across the entire maritime sector, with industry, shipping companies, ports, science, associations and political institutions (federal states, federal government and Europe). A coordination platform could provide the appropriate framework and also support the exchange between the maritime sub-sectors with the other sectors and actors of the energy transition. The German maritime sector can influence and create the framework and conditions that enable the energy transition like hardly any other sector - not only in and for Germany but internationally.

1. H₂ IN DEN MARITIMEN TEILBRANCHEN

1.1. Zusammenfassung

Die Seeschifffahrt wird durch Frachtschiffe, v. a. Containerschiffe, Frachter und Tanker, dominiert (bezüglich Anzahl, spezifischer Kraftstoffverbrauch und THG-Emissionen). Hinsichtlich der spezifischen Emissionen pro Schiff nehmen insbesondere auch Kreuzfahrtschiffe eine zentrale Rolle ein.

Für die Energieversorgung der Schiffe wird grundsätzlich zwischen Haupt- und Hilfsenergie unterschieden. Neben der benötigten Antriebsenergie durch das Hauptsystem weisen vor allem Kreuzfahrtschiffe einen weiteren hohen Energiebedarf auf, eine sogenannte Hotellast, die durch Hilfssysteme und durch Zuschaltung von Generatoren im Hauptsystem bereitgestellt werden kann.

Für die Anwendung erneuerbarer Kraftstoffe in der Seeschifffahrt wird auf internationalen/-kontinentalen Routen von Frachtschiffen v. a. Methanol, aber auch Flüssigwasserstoff und Ammoniak als Option betrachtet. Für die Kreuzschifffahrt, wie auch für kürzere Schiffsrouten entlang der Küsten und Flüsse, könnte auch die Nutzung von Druckwasserstoff eine Perspektive darstellen, z. B. durch die Erschließung von Synergien beim Aufbau und Nutzung einer Wasserstoff-Infrastruktur durch den Straßenverkehr.

Eine wesentliche Herausforderung für erneuerbare Kraftstoffe stellt die hohe Anforderung an die Energiespeicherung bzw. Systemleistungsdichte dar. Auch stellen die Verfügbarkeit der weltweiten Kraftstoffinfrastruktur entlang der Schiffsrouten, die Preisentwicklung der unterschiedlichen erneuerbaren Kraftstoffe sowie die Weiterentwicklung der Regulatorik eine große Unsicherheit für die weiteren Investitionsentscheidungen dar. Dabei ist Methanol im Verbrennungsmotor technisch am weitesten entwickelt, während Ammoniak sowohl regulatorisch (z. B. Sicherheit und Treibhausgaswirkung) als auch im Bereich der Antriebe noch Weiterentwicklungen benötigt.

Auch Brennstoffzellen (Wasserstoff oder Methanol) weisen heute noch zu geringe Maximalleistungen bzw. Leistungsdichten auf, um beispielsweise die Antriebsenergie für große Seeschiffe vollständig abzudecken (z. B. 30–50 MW). Jedoch steigt auch auf den Seeschiffen der Bedarf an elektrischer Energie (z. B. Kühlleistung, Hotellast). Hier könnten modular aufgebaute Brennstoffzellensysteme attraktive Lösungen für Nullemissionsantriebe (CO₂, Luftschadstoffe und Lärm) bieten und aufgrund des guten Teillastverhaltens als sowohl Haupt- als auch Hilfssystem dienen.

Mehr als 60 Seehäfen an der deutschen Küste und etwa 100 Binnenhäfen stellen eine wichtige Schnittstelle für den Warenumschlag dar. Relevante Anwendungen für Wasserstoff stellen hier v. a. Straddle Carrier an den Seehäfen und Reachstacker an den Binnenhäfen dar. Der perspektivische Import großer Mengen an grünem Wasserstoff und dessen Derivaten eröffnen Potenziale für die Lagerung und Weiterverteilung sowie das Bunkern.

Auch bei Werften eröffnet Wasserstoff – wie auch Methanol – für Umschlaggeräte und auch in der Logistik Chancen für die Substitution von fossilen Kraftstoffen. Wasserstoff wird auch weiterhin in existierenden Spezialanwendungen (z. B. Hydridspeicherherstellung) Anwendung finden. Ein großes Potenzial bietet der Erdgasersatz durch grünen Wasserstoff, z. B. in den Werften für die stationäre Energieerzeugung in Blockheizkraftwerken (BZ oder Turbine).

Auch in der Meerestechnik sind Potenziale für wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen zur dezentralen und modularen Stromversorgung von Endverbrauchern (z. B. Offshore-Verbraucher, Unterwasserfahrzeuge und weitere Kleinanwendungen) identifiziert worden.

1.2. Schifffahrt

In diesem Kapitel werden ein grundsätzlicher Überblick sowie eine Abgrenzung und Definition der Teilbranche Schifffahrt gegeben.

Auf Basis dieser Definitionen und Grundlagen erfolgt eine erste Einordnung und Diskussion relevanter Anwendungsfälle für Wasserstofftechnologien bzw. Schwerpunkte der Teilbranche für die weiteren Betrachtungen in den folgenden Kapiteln, u. a. in Kapitel 2 Bewertung und Perspektiven der Anwendung von Wasserstoff in den maritimen Teilbranchen.

1.2.1. Zusammenfassung

Die Teilbranche Schifffahrt wird in See- und Binnenschiffe unterteilt. Mit steigender Fahrtroute und Größe der Schiffe steigen auch die Anforderungen an die Energiemengen und Leistungen für die Energiebereitstellung. Abhängig von den (internationalen) Routen und Bunkermengen werden unterschiedliche erneuerbare Kraftstoffe für die Anwendung als Hauptsystem (Antriebsenergie) und Hilfssystem (z. B. Stromerzeugung für Kühlleistung oder Hotellast auf Fahrgastschiffen) verfolgt.

1.2.2. Überblick und Definitionen

Grundsätzlich wird in der Teilbranche Schifffahrt zwischen See- und Binnenschifffahrt unterschieden. Dabei kann die Seeschifffahrt noch in nationale und internationale Seeschifffahrt bzw. kurze und lange Fahrtrouten sowie Fracht- und Personentransport unterteilt werden.

Für die Diskussion und Identifizierung möglicher Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstofftechnologien in der Schifffahrt wird auch zwischen Hauptsystem- und Hilfssystemen differenziert.

In Kapitel 1 erfolgt eine erste Betrachtung der heutigen Energieverbräuche innerhalb der Teilbranche, um wesentliche Energiebedarfe und Verbrauchsstrukturen herauszuarbeiten und zu identifizieren.

1.2.2.1. Teilbranchenüberblick, Abgrenzung und Methodik

In diesem Teilkapitel erfolgt für die Schifffahrt eine Beschreibung der getroffenen Abgrenzung und Definitionen für die See- und Binnenschifffahrt sowie der Haupt- und Hilfssysteme. Zudem werden ein Überblick und eine erste Einordnung zur Teilbranche gegeben.

Die Betrachtung und Einordnung der Teilbranche erfolgen nach verfügbaren statistischen Daten und Kategorisierungen der BSH – Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie sowie der WSV – Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Ergänzend erfolgten Interviews mit Fachleuten und Mitgliedern der Branche, um einerseits wichtige Aspekte aus den Gesprächen in dieser Arbeit zu berücksichtigen und andererseits (Zwischen-)Ergebnisse und (Arbeits-)Thesen im Rahmen der Bearbeitungsphase frühzeitig und kontinuierlich zu berücksichtigen bzw. zu diskutieren.

Seeschifffahrt

Die Abgrenzung bzw. Definition der Seeschifffahrt in dieser Studie erfolgt anhand der verfügbaren Statistiken und Definitionen für die deutsche Handelsflotte der Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie¹⁵.

Danach setzt sich die deutsche Handelsflotte (gesamt ca. 1.700 Schiffe) vorwiegend aus Containerschiffen, Stückgutfrachtern, Mehrzwecktrockenfrachtern und Mineralöltankern zusammen (entspricht einem Anteil von 87 %). Die Zahl der Personenschiffe liegt bei 99 Schiffen bzw. 6 %, siehe auch Abbildung 3 und Abbildung 4.

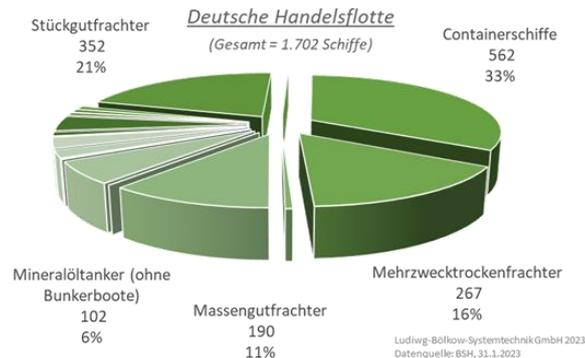


Abbildung 3: Deutsche Handelsflotte nach Schiffskategorie, Anteile in %

Wie in Abbildung 4 dargestellt, sind 85 % der Fahrgastschiffe unter deutscher Flagge zugelassen, im Gegensatz zu den Frachtschiffen mit einem Anteil von je 12 %.

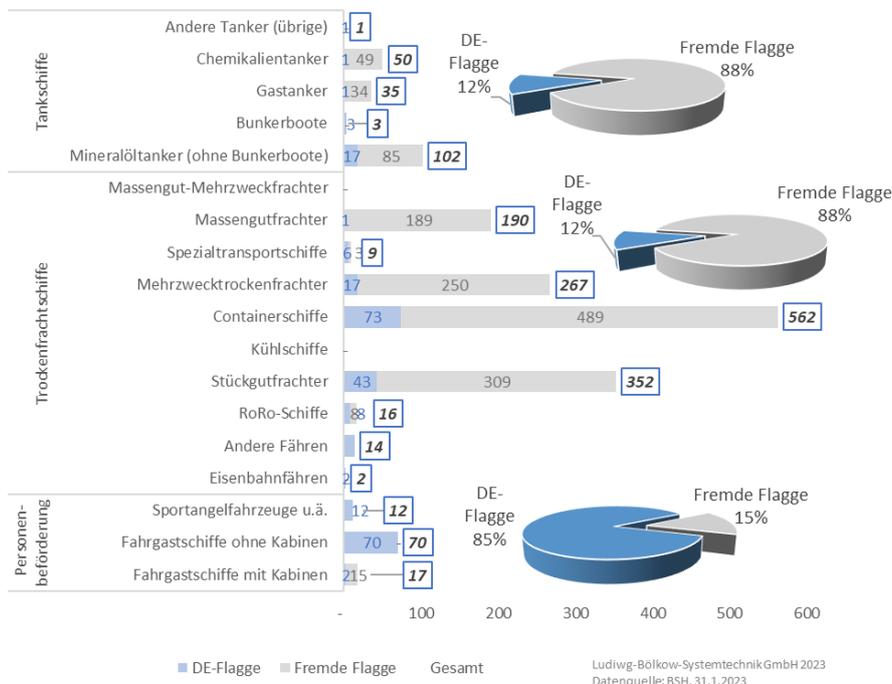


Abbildung 4: Anzahl Schiffe der deutschen Handelsflotte¹⁶, ab BRZ100, Stand Januar 2023

¹⁵ (BSH 2023): „Statistik der deutschen Handelsflotte“.

¹⁶ (BSH 2023): „Statistik der deutschen Handelsflotte“.

Binnenschifffahrt

Für die Binnenschifffahrt wird die deutsche Binnenflotte nach der Definition und der Statistik der WSV – Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes zugrunde gelegt¹⁷.

Im Jahr 2021 waren in Deutschland in der Binnenschifffahrt insgesamt 4.313 Schiffe, davon über 3.000 Frachtschiffe (70 %) und knapp 1.300 Personentransportschiffe (30 %) registriert.

Wie in der Abbildung 5 und Abbildung 6 veranschaulicht, entfiel der größten Anteil davon auf Frachtschiffe (44 %), Fahrgastschiffe (23 %), Schuten (11 %), Schub- und Schubschleppboote (6 %) sowie Fähren (6 %).

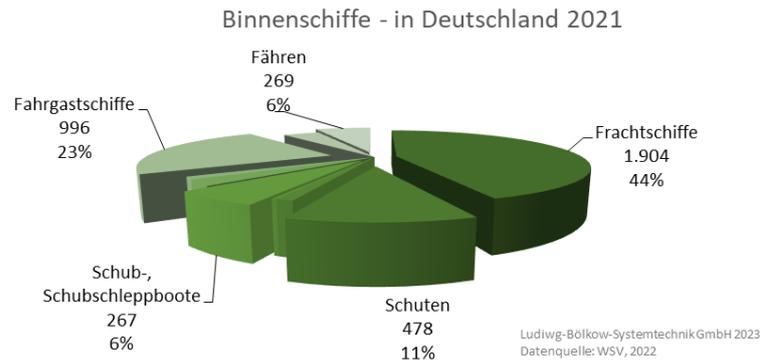


Abbildung 5: Binnenschiffe in Deutschland nach Schiffskategorie¹⁸, Anteile in %

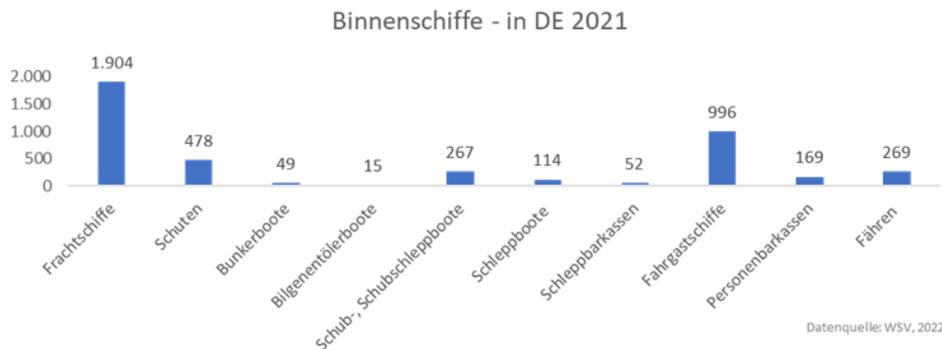


Abbildung 6: Anzahl der registrierten Binnenschiffe in Deutschland¹⁹ im Jahr 2021

Haupt- und Hilfssysteme auf dem Schiff

Auf dem Schiff wird zwischen Haupt- und Hilfssystemen unterschieden. Das Hauptsystem ist in der Regel vor allem für die Bereitstellung der (mechanischen) Antriebsenergie vorgesehen. Das Hauptsystem kann jedoch auch zur Stromerzeugung eingesetzt werden, indem beispielsweise Generatoren an der Hauptantriebswelle bei geringerer Fahrleistung zugeschaltet werden. Hierdurch können die Hilfssysteme zur Stromerzeugung, heutzutage hauptsächlich Dieselgeneratoren, ausgeschaltet oder zeitweise auf geringerer Leistung eingesetzt werden.²⁰ In diesem Fall wird also von dem Hauptsystem Hilfsenergie in Form von Strom erzeugt. In den folgenden Tabellen wird die durchschnittliche mechanische und

¹⁷ (WSV 2022): „Zentrale Binnenschifffahrtsdatei 2021“.

¹⁸ (WSV 2022): „Zentrale Binnenschifffahrtsdatei 2021“.

¹⁹ (WSV 2022): „Zentrale Binnenschifffahrtsdatei 2021“.

²⁰ (Ramboll 2022b).

elektrische Gesamtleistung für verschiedene Schiffstypen der Seeschifffahrt dargestellt. Diese werden durch das Hauptsystem und das Hilfssystem zur Verfügung gestellt, wie auch die mechanische Energie des Hauptantriebs, also die Antriebsleistung. Bei Frachtschiffen wird der Großteil der Leistung für mechanische Energie benötigt, insbesondere für den Antrieb. Kreuzfahrtschiffe stellen hierbei eine Ausnahme dar, auf die am Ende des Kapitels nochmals gesondert eingegangen wird.

Tabelle 3: Mechanische und elektrische Gesamtleistung sowie mechanische Leistung des Hauptsystems in der Seeschifffahrt²¹

Schiffstyp	Durchschn. mechanische Gesamtleistung [kW]	Durchschn. elektrische Gesamtleistung [kW]	Durchschn. mechanische Leistung Hauptsystem [kW]
Containerschiffe	38.949	8.677	32.334
Stückgutfrachter	3.749	1.123	3.207
Massengutfrachter	11.129	1.952	9.341
Öltanker	13.334	2.975	10.853
Chemikaliertanker	7.567	2.274	5.861
Andere Tanker	4.069	1.763	3.044
LPG-Tanker	7.681	2.709	5.697
LNG-Tanker	30.679	10.077	23.040
Kühlschiffe	7.703	2.906	6.886
Offshore-Schiffe	8.074	5.467	7.492
Autotransporter	17.137	3.216	14.230
RoRo-Schiffe	14.144	3.641	12.601
RoRo-/Personenfähren	17.959	8.061	16.776
Fahrgastschiffe	3.709	802	3.595
Kreuzfahrtschiffe	43.435	36.469	40.970
Behördenschiffe	1.926	2.023	1.842
Yachten	250	60	250
Sonstige	3.484	2.109	3.244

Aus der zentralen Binnenschifffahrtsdatei²² lassen sich Durchschnittswerte für die Leistungen verschiedener Schiffstypen in der Binnenschifffahrt ableiten. Diese sind in Tabelle 4 aufgeführt.

²¹ (Ramboll 2022b).

²² (WSV 2022): „Zentrale Binnenschifffahrtsdatei 2021“.

Tabelle 4: Mechanische Leistung des Hauptsystems in der Binnenschifffahrt (eigene Berechnungen aus WSV-Statistik)²³

Typ	Durchschn. mechanische Leistung Hauptsystem [kW]	Durchschn. minimale mechanische Leistung Hauptsystem [kW]	Durchschn. maximale mechanische Leistung Hauptsystem [kW]
Frachtschiffe	468		
Güterschiffe	344	43,5	1.598
Tankschiffe	877	80	1.726
Schuten	30	2	770
Klappschuten	123		
Spülschuten	1		
Schuten sonstige	5		
Bunkerboote	195	118	212
Bilgenentölerboote	195	117	224
Schub-, Schubschleppboote	408	306	1.160
Schubboote	408		
Schubschleppboote	409		
Schleppboote	228	211	617
Schleppbarkassen	129		
Fahrgastschiffe	305		
Tagesausflugsschiffe	256	116	972
Kabinenschiffe	1.297	145	1.500
Fahrgastschiffe „Bin_Seen“	194	69	626
Personenbarkassen	110		
Fähren	205		
Personenfähren	95	77	480
Wagenfähren	279	43	781

Unter Hilfssystemen auf Schiffen werden alle Energieerzeuger verstanden, die nicht für den Antrieb des Schiffes erforderlich sind. In der zivilen Schifffahrt wird unterschieden zwischen Hilfsmaschinen für seemännische Zwecke (z. B. Erzeugung elektrischer Beleuchtung), Hilfsmaschinen für maschinelle Zwecke (z. B. Maschine zum Bewegen des Hauptabsperrventils), Hilfsmaschinen für hygienische Zwecke und Hilfsmaschinen für Sicherheitszwecke²⁴. Sie können also sowohl zur Erzeugung mechanischer als auch elektrischer Energie vorgesehen sein. In Tabelle 5 werden die durchschnittliche mechanische und elektrische Leistung für Hilfssysteme für Seeschiffe abgebildet.

²³ (WSV 2022): „Zentrale Binnenschifffahrtsdatei 2021“.

²⁴ <http://www.zeno.org/Lueger-1904/A/Hilfsmaschinen>, zuletzt abgerufen am 16.5.2023.

Tabelle 5: Mechanische und elektrische Leistung der Hilfssysteme in der Seeschifffahrt²⁵

Schiffstyp	Durchschn. mechanische Leistung Hilfssysteme [kW]	Durchschn. elektrische Leistung Hilfssysteme [kW]
Containerschiffe	8.265	8.173
Stückgutfrachter	999	777
Massengutfrachter	2.183	1.913
Öltanker	3.475	2.799
Chemikalientanker	2.215	2.021
Andere Tanker	1.391	1.279
LPG-Tanker	2.690	2.414
LNG-Tanker	10.049	9.974
Kühlschiffe	3.480	3.105
Offshore-Schiffe	1.717	1.259
Autotransporter	4.246	3.571
RoRo-Schiffe	2.822	2.675
RoRo-/Personenfähren	3.846	4.058
Fahrgastschiffe	806	758
Kreuzfahrtschiffe	9.870	5.022
Behördenschiffe	487	771
Yachten		60
Sonstige	650	758

Kreuzfahrtschiffe stellen einen Sonderfall bei der Energieversorgung auf dem Schiff dar. Sie werden oftmals als „schwimmende Hotels“ bezeichnet. Wie aus Tabelle 3 und Tabelle 5 hervorgeht, bewegen sich Antriebs- und Hilfsleistung (auch Hotellast) bei Kreuzfahrtschiffen in der gleichen Größenordnung.

Da die Heterogenität der elektrisch betriebenen Infrastruktur an Bord eines Kreuzfahrtschiffes hoch ist, bieten sich hier dezentrale, modulare Energieversorgungseinheiten besonders an. Daher bieten Brennstoffzellen in diesem Fall eine besondere technische Perspektive, auf die in Kapitel 2.2.1 weiter eingegangen wird.

1.2.2.2. Übersicht Struktur Energieverbrauch / Emissionen

Zur Einschätzung und Diskussion des Energieverbrauchs der Teilbranche Schifffahrt werden verfügbare statistische Daten zugrunde gelegt. Ziel dieser Betrachtung ist es, wesentliche Energiebedarfe und Verbrauchsschwerpunkte zu identifizieren und herauszuarbeiten, um diese für eine mögliche Umstellung auf Wasserstoff bzw. Derivate in den nächsten Kapiteln zu untersuchen.

Für die offizielle Berichterstattung zu den THG-Emissionen Deutschlands an die UN in den National Inventory Reports (NIR) wird in der Schifffahrt zwischen nationaler und internationaler Seeschifffahrt unterschieden. Für die Ermittlung der Kraftstoffmengen und Emissionen der internationalen Seeschifffahrt

²⁵ (Ramboll 2022b).

(Anteil Deutschlands) werden die registrierten Bunkermengen in Deutschland nach BAFA zugrunde gelegt. Die Unsicherheiten bei der Verwendung der Bunkermengen in Deutschland sind durch die weltweiten Kraftstoffpreise bestimmt, d. h., diese können erhebliche Schwankungen aufgrund von internationalen Entwicklungen aufweisen.

Laut Umweltbundesamt wird der Großteil der Energie in der internationalen Seeschifffahrt verbraucht, gefolgt von der nationalen Seeschifffahrt. Insgesamt lag der Energieverbrauch im Jahr 2018 bei ca. 22.500 GWh/a, siehe Abbildung 7.

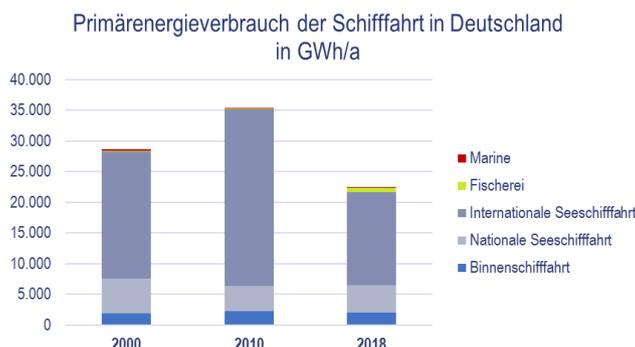


Abbildung 7: Primärenergieverbrauch der deutschen Schifffahrt²⁶ in GWh/a

In Tabelle 6 werden die in „Kraftstoffanalyse in der Schifffahrt nach Segmenten“²⁷ betrachteten Schiffe und deren durchschnittliche Kraftstoffverbräuche und CO₂-Emissionen aufgeführt. Insgesamt werden ca. 10.000 Schiffe betrachtet. Es werden also mehr bzw. andere Schiffe als in der deutschen Binnenschifffahrtsdatei und der Statistik der deutschen Handelsflotte betrachtet.

Tabelle 6: Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch und Emissionen verschiedener Schiffstypen im Jahr 2019 in t/a pro Schiff²⁸

Schiffstyp	Durchschn. Kraftstoffverbrauch ECA [t/a/Schiff]	Durchschn. Kraftstoffverbrauch non ECA [t/a/Schiff]	Durchschn. CO ₂ -Emissionen [t/a/Schiff]	Durchschn. SO _x -Emissionen [t/a/Schiff]
Containerschiffe	1.361	9.232	33.227	403
Stückgutfrachter	387	907	4.078	39
Massengutfrachter	347	3.031	10.584	133
Öltanker	812	2.470	10.331	86
Chemikalientanker	745	1.377	6.699	53
Andere Tanker	841	3.745	14.379	179
LPG-Tanker	571	1.815	7.521	67
LNG-Tanker	908	13.121	41.992	458
Kühlschiffe	471	2.941	10.794	83
Offshore-Schiffe	259	316	1.827	10

²⁶ (UBA 2020).

²⁷ (Ramboll 2022b).

²⁸ (Ramboll 2022b).

Schiffstyp	Durchschn. Kraftstoffverbrauch ECA [t/a/Schiff]	Durchschn. Kraftstoffverbrauch non ECA [t/a/Schiff]	Durchschn. CO ₂ -Emissionen [t/a/Schiff]	Durchschn. SO _x -Emissionen [t/a/Schiff]
Autotransporter	916	6.382	22.810	315
RoRo-Schiffe	3.980	3.436	23.435	131
RoRo-/Personenfähren	4.248	2.282	20.406	76
Fahrgastschiffe	65	1.686	5.580	22
Kreuzfahrtschiffe	3.657	9.145	40.495	157
Behördenschiffe	137	60	628	2
Yachten	27	254	897	1
Sonstige	104	132	752	3

Die Gesamt-Emissionen lassen sich durch die Multiplikation mit der Anzahl der Schiffe ermitteln. Die Resultate aus der Hochrechnung werden in Abbildung 8 dargestellt. Es zeigt sich, dass Containerschiffe mit Abstand der größte CO₂-Emittent sind und somit auch den größten Handlungshebel mit sich bringen.

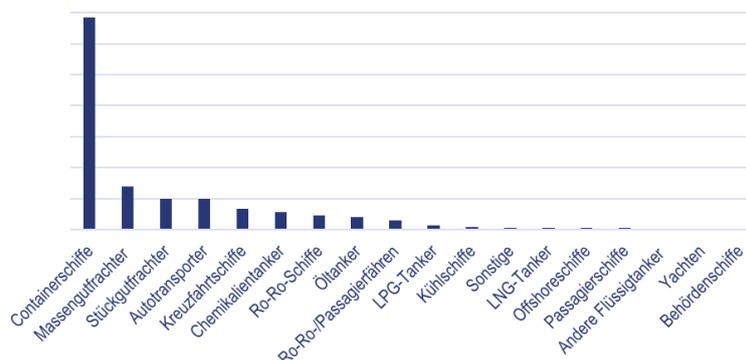


Abbildung 8: Gesamte jährliche CO₂-Emissionen je Schiffstyp²⁹

Aufgrund der EU-MRV-Regulation 2015/757³⁰ werden die Kraftstoffverbräuche von Schiffen mit einer BRZ über 5.000, die in Häfen eines EU-Mitgliedstaats anlaufen oder aus diesem auslaufen, unabhängig von der Flagge des Schiffes erfasst. RoRo- und Container-Schiffe haben demnach den höchsten durchschnittlichen Verbrauch (Tabelle 7).

²⁹ (Ramboll 2022b).

³⁰ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32015R0757>, zuletzt abgerufen am 16.5.2023.

Tabelle 7: Durchschnittliche Kraftstoffverbräuche je Schiffstyp im Jahr 2021 in t/a/Schiff³¹

Schiffstyp	Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch [t/a/Schiff]
Containerschiff	7.099
Massengutfrachter	1.377
Öltanker	2.794
Chemikaliertanker	2.018
LNG-Tanker	7.736
Autotransporter	2.783
RoRo-Schiff	7.774
RoPax-Schiff	10.842
Personenfähre	4.853
Andere Schiffstypen	2.093
Mehrzweckschiff	2.757
Container/RoRo-Frachtschiff	6.499
Gastanker	2.370
Allgemeines Frachtschiff	1.586

1.2.3. Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Derivate

Im Folgenden werden die Aktivitäten zu Wasserstoff und dessen Derivaten aufgeführt. In Tabelle 8 werden zunächst Brennstoffzellenprojekte aufgeführt. Bei der Mehrzahl der Projekte handelt es sich um Projekte mit vorkommerziellem Status. In den meisten Projekten wird H₂ bzw. LH₂ in den Brennstoffzellen eingesetzt. In einigen wenigen Projekten werden auch andere Möglichkeiten, H₂ zu speichern, erprobt. Diese sind LOHC, Metallhydrid und NaBH₄. Es gibt auch Projekte mit flüssigen Kraftstoffen wie Diesel, LNG oder Methanol. Ammoniak in Brennstoffzellen wird bisher nur in dem Pilotprojekt ShipFC Eidesvik „Viking Energy“ in Norwegen erprobt. Es handelt sich dabei um ein Offshore-Versorgungsschiff, das unter dem Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) / Clean Hydrogen Joint Undertaking³² gefördert wird. Darüber hinaus gibt es auch Projekte, bei denen Wasserstoff in Verbrennungsmotoren bzw. in Dual-Fuel-Verbrennern eingesetzt wird. Hier lässt sich der Hydrotug-Schlepper erwähnen, der seit 2021 im Hafen von Antwerpen (Belgien) eingesetzt wird.

Da Methanol häufig als relevanter Kraftstoff für die Hochseeschifffahrt aufgeführt wird, werden darauffolgend in Tabelle 9 Projekte aufgelistet, bei denen Methanol in Verbrennungsmotoren eingesetzt wird. Es zeigt sich, dass der Fokus klar auf Neubauten liegt. Von 115 Projekten beziehen sich lediglich sechs Projekte auf den Retrofit. In der Regel handelt es sich bereits um kommerzielle Projekte.

³¹ Aus (MRV 2021).

³² https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/search-all-eu-institutions-and-bodies/clean-hydrogen-joint-undertaking_en, zuletzt abgerufen am 16.5.2023.

Tabelle 8: Brennstoffzellen in Schiffen, Zusammenstellung (Demo-)Projekte und kommerzieller Aktivitäten

Projekt / Schiffsname	Typ	Land	Jahr	Brennstoffzelle	Leistung [kW]	Kraftstoff	Typ des Projektes
FCShip case 1	RoRo	Deutschland	2002-2004	MCFC / SOFC	2.000	Versch.	Studie
FCShip case 2	Fähre	Deutschland	2002-2004	PEMFC	400	H ₂	Studie
Wallenius / „Orcelle“	Autotransporter	Schweden	2004		10.000		Studie
Felicitas	Luxusyacht	Deutschland	2005 – 2008	PEMFC / SOFC	250	- / LNG	Studie
MC WAP	RoRo	Italien	2005 – 2010	MCFC	150	Diesel	Studie
Methapu / „Undine“	Autotransporter	Finnland	2006 – 2009	SOFC	20	Methanol	Prototyp
FellowShip / „Viking Lady“	Versorgungsschiff	Norwegen	2003 – 2011	MCFC	320	LNG	Prototyp
SMART H2 / „Elding“	Walbeobachtung	Island	2007 – 2010	PEMFC	10	CGH ₂	Prototyp
PaXell	Kreuzfahrtschiff	Deutschland	2009 – heute	HAT-PEMFC	120	Methanol	Prototyp
SchIBZ	Luxusyacht	Deutschland	2009 – heute	SOFC	100	Diesel	Prototyp
Germanischer Lloyd	Feederschiff	Deutschland	2012		5.000		Studie
Scandlines	Personen/Autofähre	Deutschland	2012		8.300		Studie
Fincantieri	Range Extender	Italien	2013	PEMFC	260	CGH ₂	Liefervertrag
CMR Prototech / MF “Ole Bull“	Autofähre	Norwegen	2016	PEMFC	200	CGH ₂	Demonstration
SF-BREEZE	Personenschnellfähre	USA	2016	PEMFC	4.920	CGH ₂	Studie
MS „Innogy“	Tagesausflugsschiff	Deutschland	2017	HAT-PEMFC	35	Methanol	Demonstration
Viking Cruises	Kreuzfahrtschiff	Norwegen	2017			LH ₂	Studie
Royal Caribbean	Kreuzfahrtschiff	Norwegen	2017	PEMFC	100	H ₂	Planung
SchiBZ2 / MS Forester	Mehrzweckfrachter	Deutschland	2017/2019	SOFC		Diesel	Demonstration
tkMS – MUM 1	Unterwasser Fahrzeug	Deutschland	2017/2020	PEMFC	80	H ₂	Projekt
RiverCell	Flusskreuzfahrtschiff	Deutschland	2017/2021	HAT-PEMFC		Methanol	Planung
Elektra	Schubschiff	Deutschland	2017/2021	PEMFC	2x200	CGH ₂	kommerziell

Projekt / Schiffsname	Typ	Land	Jahr	Brennstoffzelle	Leistung [kW]	Kraftstoff	Typ des Projektes
Brødrene Aa „AERO40“	Personenschnellfähre	Norwegen	2017/2021	PEMFC	8x200	CGH ₂	Planung
Fiskerstrand / HYBRIDShips	Fähre	Norwegen	2017/2020	PEMFC			Pilotprojekt
MARANDA / „Aranda“	Forschungsschiff	Finnland	2017/2021	PEMFC	165	CGH ₂	Projekt
RiverCell II	Flusskreuzfahrtschiff	Deutschland	2017/2022	HAT-PEMFC		Methanol/LNG	Demonstration
FELMAR	Binnenschiffe	Niederlande	2018/2019	PEMFC			Entwicklung
HYSEAS III	Personen/Autofähre	Schottland	2018/2021	PEMFC	7x100	CGH ₂	kommerziell
FLAGSHIPS Norled MF „Hidle“	Personen/Autofähre	Norwegen	2019/2021	PEMFC	3x200	CGH ₂	kommerziell
Norled / FS „Hydra“	Personen/Autofähre	Norwegen	2019/2021	PEMFC	2x200	LH ₂	kommerziell
„Water-go-round“	Personenfähre	USA	2019 oder 21	PEMFC	2x300	CGH ₂	Demonstration
FLAGSHIPS CFT	Schubschiff	Frankreich	2019/2021	PEMFC	2x200	CGH ₂	kommerziell
Samsung Heavy Industries	LNG-Tanker	Korea	2019/2021	SOFC		LNG	Projekt
Pa-X-ell 2 / AIDAnova	Kreuzfahrtschiff	Deutschland	2019/2022	HAT-PEMFC	1.000	Methanol	Demonstration
„Emeli“	Trainingsbinnenschiff	Niederlande	2019	PEMFC	30	CGH ₂	Schulung
Sinot / „Aqua“	Megayacht	Niederlande	2019	PEMFC		LH ₂	Entwurf
Elektra II	Schubboot	Deutschland	2019/2024			H ₂	Prototyp
tkMS – MUM 2	Unterwasserfahrzeug	Deutschland	2021/2025	PEMFC	80	H ₂	Entwicklung
„Ulstein SX 190“	CSV	Norwegen	2020	PEMFC	2.000	CGH ₂	Projekt
MultiSchiBZ	Fahrgastschiff	Deutschland	2020/2022	SOFC		Diesel/LNG	Entwicklung
Navig8/Doosan/Ceres	Chemikalienanker	UK/Korea	2020/2024	SOFC			Studie/Projekt
MSC/Fincantieri/Snam	Kreuzfahrtschiff	Italien	2021	FC			Studie
Ceres/GE/MSC/LR	große Schiffe	UK	2021	SOFC	> 1.000	various	Studie
Ceres/Carnival/LR	Kreuzfahrtschiff	UK	2021	SOFC	10.000	various	Studie
Lürssen „Alice“	Luxusyacht	Deutschland	2021	FC		Methanol	Projekt
Fincantieri „ZEUS“	Forschungsschiff	Italien	2021	PEMFC	144	Metallhydrid	Demonstration

Projekt / Schiffsname	Typ	Land	Jahr	Brennstoffzelle	Leistung [kW]	Kraftstoff	Typ des Projektes
HIMET – MV „Shapinsay“	RoRo-Fähre	UK	2021/2022	PEMFC	< 500	H ₂	Projekt
Coriolis / Hereon	Forschungsschiff	Deutschland	2022/2024	PEMFC	100	Metallhydrid	kommerziell
UC SAN DIEGO	Forschungsschiff	USA	2022 ff	PEMFC	800	LH ₂	kommerziell
MSC / „World Europa“	Kreuzfahrtschiff	Frankreich	2022	SOFC	150	LNG	kommerziell
Samsung Heavy Industries	LH ₂ -Tanker	Korea	2022	PEMFC		LH ₂	Projekt
WEVA-Projekt „Antonie“	Binnenschiff	Niederlande	2022/2023	PEMFC	400	CGH ₂	Pilotprojekt
Havyard „Havila Kystruten“	RoPax-Fähre	Norwegen	2023	PEMFC	3.200	LH ₂	Pilotprojekt / Retrofit
„Hydrogen One“	Schlepper	USA	2023	FC	ca. 1500	Methanol	in Planung
HS NeoOrbis	Fahrgastschiff	Niederlande	2023	FC		NaBH ₄	Pilotprojekt
HADAG (3 Stck)	Hafenfähre	Deutschland	2024	PEMFC		CGH ₂	Retrofit in Planung
Torghatten Nord (1)	Personen/Autofähre	Norwegen	2024	PEMFC	6.000	CGH ₂	kommerziell
Torghatten Nord (2)	Personen/Autofähre	Norwegen	2025	PEMFC	6.000	CGH ₂	kommerziell
HI-Fived – Acua Ocean	autonomes USV	Schottland	2022/2024	PEMFC		LH ₂	Projekt
FLAGSHIPS „Zulu 06“	Binnenschiff	Frankreich	2023	PEMFC	2x200	CGH ₂	kommerziell
FLAGSHIPS FPS „Waal“	Binnenschiff	Niederlande	2023	PEMFC	1.200	CGH ₂	Retrofit
FPS „Maas“	Binnenschiff	Niederlande	2023	PEMFC	3x275	CGH ₂	Retrofit
Odfjell	Chemical Tanker	Norwegen	2023	SOFC	1.200 /10.000	various	Pilotprojekt
Ma-Hy-Hy / Torqueedo	Projekt	Deutschland	2023	PEMFC	71	CGH ₂	Prototyp
CCRV	Forschungsschiff	USA	2023	PEMFC			kommerziell
Fincantieri „HyShip® 72“-	„ZEUS“-Schiff	Italien	2022	PEMFC	2x71	CGH ₂	kommerziell
„Rhenus Mannheim I“	Binnenschiff	Deutschland	2023	FC		H ₂	kommerziell
„Rhenus Mannheim II“	Binnenschiff	Deutschland	2023	FC		H ₂	kommerziell
Lürssen / „Cosmos“	Luxusyacht	Deutschland	2023/2025	HAT-PEMFC		Methanol	kommerziell
„Silver Nova“	Kreuzfahrtschiff	UK	2023	HAT-PEMFC	4.000	Methanol	Demonstration

Projekt / Schiffsname	Typ	Land	Jahr	Brennstoffzelle	Leistung [kW]	Kraftstoff	Typ des Projektes
„Silver Ray“	Kreuzfahrtschiff	UK	2024	HAT-PEMFC	4.000	Methanol	kommerziell
ShipFC Eidesvik „Viking Energy“	OSV	Norwegen	2024	SOFC	2.000	Ammoniak	Pilotprojekt
HySHIP „Topeka“	RoRo-Frachter	Norwegen	2024	PEMFC	3.000	LH ₂	Pilotprojekt
Ektank AB	Produktentanker	Schweden	2024	PEMFC	2.400	CGH ₂	Demonstration / Retrofit
L'équipage / HyBarge	Binnenfrachtschiff	Frankreich	2024	PEMFC		CGH ₂	kommerziell
TECO 2030	Highspeed-Fahrzeug	Norwegen	2025	PEMFC		CGH ₂	Pilotprojekt
EDGE / Ulstein	Containerschiff	Norwegen	2025	PEMFC		H ₂	Projekt
Energy Observer 2	Mehrzweckfrachter	International	2025	PEMFC	2.500	LH ₂	Prototyp
Condor H2 (50 Stck)	Short Sea / Binnenschiff	Niederlande	> 2025	PEMFC		CGH ₂	Projekt
DFDS / „Europa Seaways“	RoPax-Fähre	Dänemark	2027	PEMFC	23.000	CGH ₂	verschoben
Ship-aH2oy	Edda Wind SOV	Norwegen	2023/2027	SOFC	> 1.000	LOHC	Projekt
MSC / „Explora V“	Kreuzfahrtschiff	Italien	2027	FC	6.000	LH ₂	kommerziell
MSC / „Explora VI“	Kreuzfahrtschiff	Italien	2028	FC	6.000	LH ₂	kommerziell
„Gotland Horizon X“	Highspeed-Katamaran	Schweden	< 2030	Gasturbine		H ₂ u. a.	Projekt
GreenPlug / H2SB (9 Stck)	Schubschiff	Deutschland		PEMFC		CGH ₂	in Planung
Occitanie Region / „HyDrOMer“	Bagger	Frankreich		PEMFC	200	CGH ₂	in Planung
Samskip (2 Stck) + (2 opt)	Feederschiff	Norwegen		PEMFC		H ₂	beauftragt
„Rhenus Ludwigshafen“	Binnenschiff	Deutschland		FC		H ₂	geplant

Tabelle 9: Methanol in Schiffen mit Verbrennungsmotor, Bauprojekte und existierende Schiffe

Anzahl	Projekt / Schiffsname	Typ	Land	Jahr	Antrieb	Leistung [kW]	Kraftstoff	Klasse	Typ des Projektes
1	„Stena Germanica“	RoPax-Fähre	Schweden	2015	DF VM	4 x 5.750	Methanol	LR	Retrofit
1	„Cajun Sun“	Öl-/Chemikalien-tanker	Cayman Islands	2016	DF VM		Methanol	NK	Neubau
1	„Leikanger“	Öl-/Chemikalien-tanker	Norwegen	2016	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Lindanger“	Öl-/Chemikalien-tanker	Norwegen	2016	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Manchac Sun“	Öl-/Chemikalien-tanker	Cayman Islands	2016	DF VM		Methanol	NK	Neubau
1	„Mari Boyle“	Öl-/Chemikalien-tanker	Norwegen	2016	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Mari Jone“	Öl-/Chemikalien-tanker	Norwegen	2016	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Taranaki Sun“	Öl-/Chemikalien-tanker	Cayman Islands	2016	DF VM		Methanol	NK	Neubau
1	„Creole Sun“	Öl-/Chemikalien-tanker	Panama	2019	DF VM		Methanol	DNV/NK	Neubau
1	„Mari Couva“	Öl-/Chemikalien-tanker	Norwegen	2019	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Mari Kokako“	Öl-/Chemikalien-tanker	Norwegen	2019	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Takaroa Sun“	Öl-/Chemikalien-tanker	Singapur	2019	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Capilano Sun“	Öl-/Chemikalien-tanker	Panama	2021	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Mari Innovator“	Öl-/Chemikalien-tanker	Norwegen	2021	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Pilot 120 SE“	Lotsenversetzschiff	Schweden	2021	DF VM		Methanol	unknown	Retrofit
1	„Andean Sun“	Öl-/Chemikalien-tanker	Panama	2022	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Bayou Sun“	Öl-/Chemikalien-tanker	Panama	2022	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Grouse Sun“	Öl-/Chemikalien-tanker	Singapur	2022	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Methatug“	Schlepper	Belgien	2022	DF VM		Methanol	unknown	Retrofit
1	„Seymor Sun“	Öl-/Chemikalien-tanker	Singapur	2022	DF VM		Methanol	DNV	Neubau

Anzahl	Projekt / Schiffsname	Typ	Land	Jahr	Antrieb	Leistung [kW]	Kraftstoff	Klasse	Typ des Projektes
1	„Stena Pro Marine“	Öl-/Chemikalien-tanker	Zypern	2022	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Stena Pro Patria“	Öl-/Chemikalien-tanker	Zypern	2022	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Stena Promise“	Öl-/Chemikalien-tanker	Zypern	2022	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Stena Prosperous“	Öl-/Chemikalien-tanker	Zypern	2022	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	Middle Range Patrol Boat	Küstenwachboot	Griechenland	2023	DF VM		Methanol	unknown	Retrofit
1	„Cyprus Sun“	Öl-/Chemikalien-tanker	Zypern	2023	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Progressive“	Öl-/Chemikalien-tanker	Zypern	2023	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Provident“	Öl-/Chemikalien-tanker	Panama	2023	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	„Savonetta Sun“	Öl-/Chemikalien-tanker	Panama	2023	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN / Maersk	Containerschiff	Dänemark	2023	DF VM		Methanol	ABS	Neubau; 2.100 TEU
1	„Uthörn II“	Forschungsschiff	Deutschland	2023	VM- elektr.	2 x 300	Methanol	DNV	Neubau
1	„Stolt Ijssel“	Tanker	Niederlande	2023	VM / DF VM	1206 / 699	Diesel / Methanol		Neubau
1	„Boreas“	Offshore-Support-Schiff	Norwegen	2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 1	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 1	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 1	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 1	Offshore-Support-Schiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 1	Offshore-Support-Schiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 10	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	ABS	Neubau

Anzahl	Projekt / Schiffsname	Typ	Land	Jahr	Antrieb	Leistung [kW]	Kraftstoff	Klasse	Typ des Projektes
1	TBN 11	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 12	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 2	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 2	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 2	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 2	Offshore-Support-Schiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 3	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 3	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 4	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 4	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 5	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 5	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 6	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 6	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 7	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 7	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 8	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 8	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 9	Containerschiff		2024	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	HSHI 1	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	HSHI 2	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	HSHI 3	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	HSHI 4	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	HSHI 5	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	HSHI 6	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	DNV	Neubau

Anzahl	Projekt / Schiffsname	Typ	Land	Jahr	Antrieb	Leistung [kW]	Kraftstoff	Klasse	Typ des Projektes
1	TBN 1	Massengutschiff		2025	DF VM		Methanol	unknown	Neubau
1	TBN 1	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	BV	Neubau
1	TBN 1	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	KR	Neubau
1	TBN 1	Kreuzfahrtschiff		2025	DF VM		Methanol	unknown	Neubau
1	TBN 1	Sonstiges		2025	DF VM		Methanol	unknown	Neubau
1	TBN 13	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 14	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 15	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 16	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 17	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 18	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 2	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	BV	Neubau
1	TBN 2	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	KR	Neubau
1	TBN 3	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	BV	Neubau
1	TBN 3	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	KR	Neubau
1	TBN 4	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	BV	Neubau
1	TBN 5	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	BV	Neubau
1	TBN 6	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	BV	Neubau
1	TBN 8	Containerschiff		2025	DF VM		Methanol	KR	Neubau
1	HSHI 10	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	HSHI 11	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	HSHI 12	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	HSHI 7	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	HSHI 8	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	HSHI 9	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	DNV	Neubau

Anzahl	Projekt / Schiffsname	Typ	Land	Jahr	Antrieb	Leistung [kW]	Kraftstoff	Klasse	Typ des Projektes
1	TBN 1	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	ABS	Neubau
1	TBN 2	Massengutschiff		2026	DF VM		Methanol	unknown	Neubau
1	TBN 2	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	ASB	Neubau
1	TBN 4	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	KR	Neubau
1	TBN 5	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	KR	Neubau
1	TBN 6	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	KR	Neubau
1	TBN 7	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	KR	Neubau
1	TBN 9	Containerschiff		2026	DF VM		Methanol	KR	Neubau
1	TBN 10	Containerschiff		2027	DF VM		Methanol	ABS/CCS	Neubau
1	TBN 3	Containerschiff		2027	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 4	Containerschiff		2027	DF VM		Methanol	DNV	Neubau
1	TBN 5	Containerschiff		2027	DF VM		Methanol	LR	Neubau
1	TBN 8	Containerschiff		2027	DF VM		Methanol	CCS	Neubau
1	TBN 9	Containerschiff		2027	DF VM		Methanol	CCS	Neubau
1	TBN 11	Containerschiff		2028	DF VM		Methanol	ABS/CCS	Neubau
1	TBN 12	Containerschiff		2028	DF VM		Methanol	ABS/CCS	Neubau
1	TBN 6	Containerschiff		2028	DF VM		Methanol	LR	Neubau
1	TBN 7	Containerschiff		2028	DF VM		Methanol	ABS/CCS	Neubau
12	Typ Stena E-Flexer	RoPax-Fähre	Schweden / UK	2019 – 2023	DF VM	2 x 12.600	Methanol	DNV	Fitted for Retrofit
80	Berge Bulk / ABS	Trockenmassengutschiff	Singapur / USA	2024	DF VM		Methanol		Machbarkeitsstudie Retrofit
8	Maersk	Containerschiff	Dänemark	2024	DF VM		Methanol		Neubau; 16.000 TEU
4	Maersk	Containerschiff	Dänemark	2024-2025	DF VM		Methanol		Neubau; 16.000 TEU

H₂ IN DEN MARITIMEN TEILBRANCHEN

Anzahl	Projekt / Schiffsname	Typ	Land	Jahr	Antrieb	Leistung [kW]	Kraftstoff	Klasse	Typ des Projektes
6	Maersk	Containerschiff	Dänemark	2024-2025	DF VM		Methanol		Neubau; 17.000 TEU
1	Celebrity Cruises	Kreuzfahrtschiff	USA	2025	DF VM	2 x 9.600 HiMasch	Methanol u. a.		Neubau
4	COSCO	Containerschiff	China	ab 2025	DF VM	ca. 45.000	Methanol		Neubau; 16.000 TEU
Serie	Damen / Caterpillar	Schlepper	Niederlande	2026	DF VM		Methanol		Entwicklung

Im Bereich der Bordstromversorgung im Hafen liegt momentan der Fokus auf Projekten, die sich mit der Landstromversorgung beschäftigen. In der Förderrichtlinie BordstromTech-II³³ wurden bisher vor allem diese Projekte für die Förderung bewilligt:

- Mobile Landstromversorgung in Bremerhaven
- Ertüchtigung von RoPax-Fähren zur Landstromaufnahme
- Ertüchtigung von einem Kreuzfahrtschiff zur Landstromaufnahme
- Mobile Landstromversorgung einer Elektrofähre

Es wird jedoch auch eine H₂-Power-Unit für Offshore-Versorger im Wattenmeer Bereich gefördert.³⁴ Das Schiff „Coastal Liberty“ soll durch eine Brennstoffzelle an Bord in den Hafen- und Wattenmeer-Bereichen ohne den Dieselantrieb auskommen.³⁵

Ein weiteres Projekt, das im Zusammenhang mit Offshore-Versorgern liegt, ist die Umrüstung der Mittelplate-Versorgerflotte auf einen Wasserstoff-Hybrid-Antrieb. Ende 2020 wurde die Machbarkeit bestätigt. Perspektivisch sollen die Schiffe emissionsfrei durch einen Elektromotor mit H₂-Brennstoffzellen betrieben werden.³⁶

1.3. Häfen

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den Teilsektor Häfen gegeben. Zum einen wird der Sektor für den Zweck dieser Studie abgegrenzt und das grundsätzliche Vorgehen erläutert. Zum anderen wird eine Bestandsaufnahme des Sektors Hafen durchgeführt. Ziel ist es, zu verstehen, wie der Sektor strukturiert ist, wo Energie verbraucht wird bzw. wo CO₂-Emissionen entstehen und welche Aktivitäten es in den Bereichen Wasserstoff und Dekarbonisierung bereits gibt, um einschätzen zu können, wo H₂-Anwendungen im Hafenumfeld zukünftig eine Rolle spielen werden.

1.3.1. Zusammenfassung

An den deutschen Häfen agieren im Wesentlichen zwei Akteursgruppen mit teilweise unterschiedlichen Interessen in Bezug auf Energiefragen – die Infrastrukturbetriebe zur Bereitstellung der Flächen und Infrastrukturen und die Terminalbetreiber (Logistikunternehmen), die den Güterumschlag verantworten.

Der Gesamtenergiebedarf der deutschen Häfen wurde auf etwa 3.710 GWh/a geschätzt, davon entfallen 2.160 GWh/a auf die Seehäfen und 1.550 GWh/a auf die Binnenhäfen.

Ein großer Anteil des Verbrauchs entfällt auf die Hafenumschlaggeräte, im Wesentlichen auf Straddle Carrier an den Seehäfen und auf Reachstacker an den Binnenhäfen. Da diese Geräte auch bereits als Prototypen mit Wasserstoffantrieben vorhanden sind, könnten sie zukünftig wichtige Wasserstoffverbraucher darstellen.

³³ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/WS/bordstromtech.html>, zuletzt abgerufen am 16.5.2023.

³⁴ (BordstromTech II 2023).

³⁵ <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/h2-power-unit/>, zuletzt abgerufen am 17.5.2023.

³⁶ <https://wintershalldea.com/de/newsroom/wasserstoff-mittelplate>, zuletzt abgerufen am 17.5.2023.

Die Elektrifizierung der Häfen inklusive der Landstromversorgung der Liegeplätze ist ein wichtiges Thema, das teilweise sehr kontrovers diskutiert wird.

Das Thema Wasserstoff spielt für die Häfen insgesamt eine sehr wichtige Rolle und wird mit großem Momentum vorangetrieben (z. B.: Hamburg → Projekt Clean Port & Logistics, Duisburg → enerPort II, Bremerhaven → H₂Bx.), wobei Anwendungen auf den Hafengebieten noch nicht im Hauptfokus sind, sondern mehr die Themen Importe von Wasserstoff und dessen Derivaten, deren Umschlag, Lagerung und Weiterverteilung sowie das Bunkern.

1.3.2. Überblick und Definitionen

In der vorliegenden Studie wird unterschieden zwischen Seehäfen und Binnenhäfen. Während Seehäfen überwiegend die Schnittstelle zwischen See- und Landwegen darstellen, versorgen Binnenhäfen hauptsächlich standortnahe und im unmittelbaren Hinterland befindliche Industrie und Gewerbe.

Seehäfen

An den deutschen Küsten gibt es mehr als 60 Seehäfen, in denen der Großteil der deutschen Außenhandelsgüter umgeschlagen wird. Darüber hinaus sind diese Häfen enorm wichtig für den innerdeutschen und innereuropäischen Kurzstreckenverkehr (z. B. Fährverkehr). Da es neben den großen Containerhäfen viele mittlere und kleine Häfen mit Verbindungen in den Nord- und Ostseeraum gibt, ist die Hafenlandschaft in Deutschland sehr inhomogen.³⁷ Tabelle 10 listet die deutschen Seehäfen mit einem Güterumschlag größer 2 Mio. t/a.

Tabelle 10: Deutsche Seehäfen nach Güterumschlag³⁸

Hafen	Güterumschlag 2021 [1.000 t]	in %
Gesamt	288.659	100
Hamburg	111.156	38,5
Bremerhaven	46.815	16,2
Wilhelmshaven	23.744	8,2
Rostock	22.341	7,7
Lübeck	17.079	5,9
Bremen	12.845	4,4
Brunsbüttel	8.355	2,9
JadeWeserPort	6.698	2,3
Stade	5.919	2,1
Fehmarn	5.677	2,0
Brake (Unterweser)	5.163	1,8
Emden	4.032	1,4
Kiel	5.364	1,9
Wismar	2.708	0,9
Cuxhaven	2.414	0,8

³⁷ (Statistikamt Nord 2015).

³⁸ (DESTATIS 2022).

Hafen	Güterumschlag 2021 [1.000 t]	in %
Weitere	8.349	2,9

Die Rostock Port GmbH³⁹ teilt die öffentlichen Seehäfen in Deutschland in drei verschiedene Organisationsstrukturen ein. In der Literatur findet man aber auch andere Strukturierungen möglicher Hafenerbetreibermodelle:

Landlord Ports

Die Infrastruktur befindet sich in öffentlicher Hand und wird von ihr finanziert und betrieben. Finanzierung und Betrieb der Suprastruktur⁴⁰ obliegen dagegen privaten Dritten. Beispiele: Hamburg, Rostock, Lübeck.

Tool Ports

Infra- und Suprastruktur befinden sich in öffentlicher Hand, die privaten Umschlagunternehmen mieten jeweils die von ihnen in Anspruch genommenen Suprastrukturen.

Service Ports

Infra- und Suprastruktur befinden sich in öffentlicher Hand und werden von ihr betrieben. Vor allem kleinere Häfen sind so organisiert. Beispiele: Wismar, Sassnitz, Stralsund.

Ein prinzipielles Verständnis dieser verschiedenen Organisationsstrukturen ist erforderlich, um verfügbare Informationen zu Energieverbräuchen und CO₂-Emissionen (z. B. aus Nachhaltigkeitsberichten) richtig einschätzen zu können.

Binnenhäfen

In Deutschland gibt es etwa 100 Binnenhäfen, die für den Gütertransport von Bedeutung sind. Auch hier ist die Struktur sehr inhomogen, was die Umschlagmengen, die Zusammensetzung der umgeschlagenen Güter und somit auch die eingesetzten Hafenumschlaggeräte und die benötigten Energiemengen betrifft. Tabelle 11 listet die deutschen Binnenhäfen mit einem Güterumschlag größer 2 Mio. t/a.

Tabelle 11: Deutsche Binnenhäfen nach Güterumschlag⁴¹

Hafen	Güterumschlag 2021 [1.000 t]	in %
Gesamt	206.724	100
Duisburg	44.965	21,8
Köln	9.858	4,8
Hamburg	7.614	3,7
Mannheim	7.349	3,6
Ludwigshafen am Rhein	6.930	3,4
Neuss	6.592	3,2
Karlsruhe	6.370	3,1

³⁹ (RP 2020).

⁴⁰ Definition Suprastruktur: alle Einrichtungen, die für Transport-, Umschlag- und Lager- sowie Beschaffungs- und Verarbeitungsprozesse innerhalb einer Verkehrsanlage nach <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/405189/>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

⁴¹ (DESTATIS 2022a).

Frankfurt am Main	5.408	2,6
Gelsenkirchen	4.901	2,4
Kehl	4.397	2,1
Krefeld	3.391	1,6
Bremen	3.288	1,6
Mainz	3.130	1,5
Marl	3.096	1,5
Brunsbüttel	2.830	1,4
Bottrop	2.798	1,4
Salzgitter	2.699	1,3
Andernach	2.687	1,3
Magdeburg	2.672	1,3
Saarlouis	2.578	1,2
Lünen	2.337	1,1
Heilbronn	2.157	1,0
Hamm	2.123	1,0
Wesseling	2.099	1,0
Lingen (Ems)	2.094	1,0
Wesel	2.054	1,0
Leverkusen	2.023	1,0
Weitere	58.282	28,2

Gegenwärtig setzt sich der Energiebedarf in Häfen – abgesehen von dem Bebunkern –, die in dieser Studie im Teilbereich Schifffahrt betrachtet werden, hauptsächlich aus dem Kraftstoffbedarf der Hafenumschlaggeräte und Rangierlokomotiven, dem Wärmebedarf für Gebäudeheizung und dem Strombedarf (elektrische Antriebe, Versorgung von Kühlcontainern, Freiflächenbeleuchtung, Gebäudeversorgung etc.) zusammen. Zukünftig wird zunehmend die Landstromversorgung von Schiffen an ihren Liegeplätzen eine wesentliche Rolle spielen, auf die sich die Häfen vorbereiten müssen.

1.3.2.2. Teilbranchenüberblick, Abgrenzung und Methodik

Im Teilsektor Häfen liegt der Fokus auf Häfen mit Güterumschlag. Betriebshäfen beispielsweise von Werften oder industrieeigene Häfen werden hier nicht betrachtet.

Zunächst werden die verfügbaren Informationen zu Energieverbräuchen im Hafengebiet/-gelände, von Hafenfahrzeugen (Hafenumschlaggeräte, Lkw etc.), Rangierfahrzeugen (Rangierloks/Züge) und Immobilien (Terminal-Lagerhallen, Bürogebäude etc.) betrachtet.

Einen Sonderfall stellt hier die Energieversorgung von Schiffen am Liegeplatz dar. Erfolgt die Energieerzeugung auf dem Schiff, ist dies dem Teilsektor Schifffahrt zuzuordnen. Wird das Schiff über Landstrom versorgt, wird der ggf. über Rückverstromung entstehende H₂-Bedarf dem Teilsektor Häfen zugeordnet. Nicht betrachtet wird hafenansässige Industrie.

Den Energieverbräuchen wird sich über Umweltberichte, (H₂-)Projekte im Hafenumfeld und Studien genähert. Umweltberichte von Infrastruktur- bzw. Terminalbetreibern geben Aufschluss über die Verteilung bzw. Größenordnung der verschiedenen Energieverbrauchsquellen.

Die Studie „Alternative Antriebe für Hafenumschlaggeräte“⁴², koordiniert durch die NOW GmbH, ist Grundlage für die Betrachtung der Hafenumschlaggeräte. Dort wurde basierend auf einer Umfrage der Bestand von Hafenumschlaggeräten in deutschen See- und Binnenhäfen ermittelt. Inhalt sind auch CO₂-Emissionen sowie Einschätzungen zur technologischen Reife verschiedener Gerätetypen.

1.3.2.3. Übersicht Struktur Energieverbrauch / Emissionen

Im Folgenden wird die Struktur des Energieverbrauchs und der Emissionen im Hafensektor untersucht. Hierzu werden zunächst Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitsberichte von Infrastruktur- bzw. Terminalbetreibern betrachtet.

Wie bereits eingangs erwähnt, wird in Seehäfen insbesondere der Import/Export und Transit von Waren abgewickelt. Binnenhäfen hingegen organisieren auch die Lagerung und Distribution von Waren und Gütern. Deshalb ist die Struktur des Energieverbrauchs von Binnen- und Seehäfen nicht vergleichbar.

NPorts

Das Unternehmen Niedersachsen Ports (NPorts) ist ein Infrastrukturbetreiber, der die Hafeninfrastruktur an 15 niedersächsischen Häfen (sowohl Binnen- als auch Hochseehäfen) bereitstellt. NPorts verpachtet also Hafengebiete an Terminalbetreiber oder Logistikunternehmen. Im Jahr 2021 wurden durch NPorts 24,7 Mio. t Waren umgeschlagen, davon 21,2 Mio. t in Seehäfen. Der aktuelle Umweltbericht 2023⁴³ bildet den Energieverbrauch und die Emissionen von NPorts ab, nicht aber den Energieverbrauch und die Emissionen der Terminalbetreiber oder der Logistikunternehmen, die im Hafen tätig sind. Es ist also wichtig, zu betonen, dass die folgend abgebildeten Energieverbräuche/Emissionen nicht für die gesamten Häfen gelten, sondern nur solche, die im Rahmen der von NPorts durchgeführten Tätigkeiten entstehen. Der Hauptenergieverbrauch entsteht jedoch bei den Terminalbetreibern. Der Anteil von NPorts selbst am gesamten Energieverbrauch im Hafen ist sehr gering und wird auf kleiner 5 % geschätzt. In Abbildung 9 werden der Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen von NPorts für Brennstoffe, Stromverbraucher, Umschlaggeräte und Fuhrpark dargestellt. Der Energieverbrauch 2021 lag bei ca. 14 GWh und die CO₂-Emissionen beliefen sich auf ca. 2.300 tCO₂ (ausgenommen Verbräuche durch von NPorts betriebene Schiffe). Strom und Brennstoffe stellen den Hauptenergiebedarf von NPorts dar. Die Umschlaggeräte sind von geringerer Relevanz. Dies lässt sich aber möglicherweise mit der Tatsache begründen, dass NPorts Infrastrukturbetreiber und nicht Terminalbetreiber ist.

⁴² (Ramboll 2022).

⁴³ (NPorts 2023).



Abbildung 9: NPorts - Energieverbrauch und CO₂-Emissionen⁴⁴

Port of Kiel

Im Umweltbericht des Seehafens Port of Kiel⁴⁵ wird zwischen Rangierfahrten im kombinierten Verkehr, Fuhrpark und Immobilien unterschieden. Die Schiffsemissionen am Liegeplatz werden ebenfalls angegeben, an dieser Stelle jedoch nicht berücksichtigt. Auch hier ist wieder zu betonen, dass sich der Umweltbericht ausschließlich auf den Infrastrukturbetreiber Port of Kiel bezieht und nicht auf die hafenansässigen Terminalbetreiber und Logistikunternehmen. Wie in Abbildung 10 zu erkennen, lagen die CO₂-Emissionen im Jahr 2020 bei ca. 2.700 tCO₂. Hieraus wurde der Energiebedarf über die CO₂-Emissionen je Energie für Diesel (263,69 gCO₂/kWh) abgeschätzt. Anders als bei NPorts ist hier der Fuhrpark der Hauptenergieverbraucher. Im Port of Kiel lag der Güterumschlag 2020 bei ca. 6,9 Mio. t und 2021 bei ca. 7,6 Mio. t (vergleiche Tabelle 10: 5,4 Mio. t für 2021)⁴⁶.

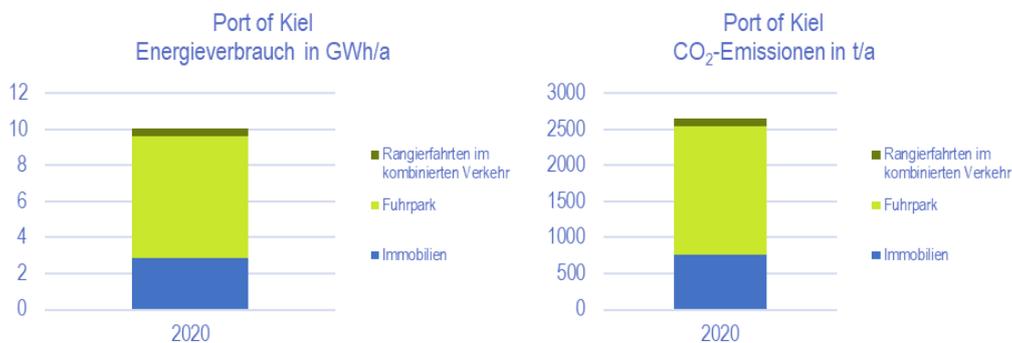


Abbildung 10: Port of Kiel - Energieverbrauch und CO₂-Emissionen⁴⁷

Rostock Port

Der Nachhaltigkeitsbericht des Seehafens Rostock Port⁴⁸ erfasst den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen für die Fahrzeugflotte, den Fernwärmeeinsatz, den Erdgaseinsatz für Heizungsanlagen und für Strom. Insgesamt betrug der Energieverbrauch des Infrastrukturbetreibers Rostock Port im Jahr 2018 ca. 4,7 GWh und der CO₂-Ausstoß 2.069 t (siehe Abbildung 11). Größter Verbraucher war dabei der Bereich

⁴⁴ LBST nach (NPorts 2023).

⁴⁵ (POK 2021).

⁴⁶ <https://www.portofkiel.com/statistik.html>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

⁴⁷ LBST nach (POK 2021).

⁴⁸ (RP 2020).

Strom, gefolgt von Wärme und der Fahrzeugflotte. Der Güterumschlag des Rostock Ports lag 2018 bei 25,6 Mio. t und 2021 bei ca. 29 Mio. t (vergleiche Tabelle 8: 22,3 Mio. t für 2021).⁴⁹

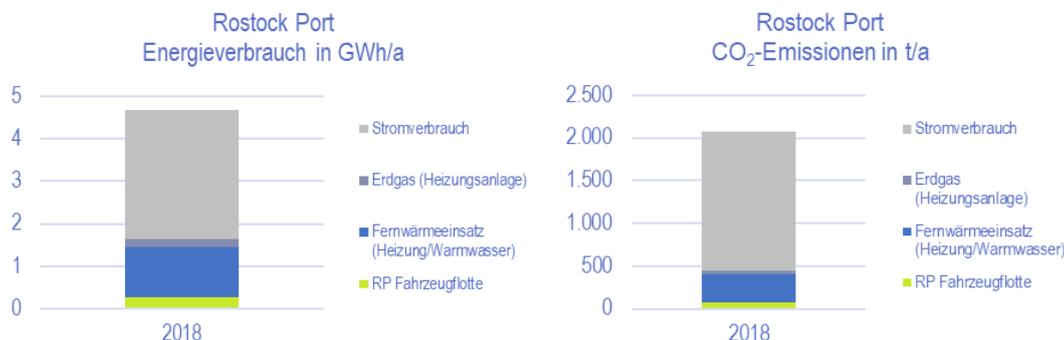


Abbildung 11: Rostock Port - Energieverbrauch und CO₂-Emissionen (nach RP 2020)

Die Betrachtung der Umweltberichte von NPorts, Port of Kiel und Rostock Port ist sehr hilfreich, um einen Einblick in die sehr inhomogene Darstellungsweise der Energieverbräuche und CO₂-Emissionen zu erhalten. Allerdings sind die daraus ableitbaren Ergebnisse nicht geeignet, die Gesamtenergieverbräuche der Häfen zu ermitteln, da sie jeweils nur die Verbräuche der Infrastrukturbetreiber und nicht die der Logistikunternehmen berücksichtigen.

Bremerhaven

Als nach Güterumschlagzahlen zweitgrößter deutscher Seehafen wurde Bremerhaven für weitere Analysen herangezogen, da für diesen Hafen Informationen zum gesamten Energieverbrauch zur Verfügung stehen.

Der Energieverbrauch des Hafens Bremerhaven setzt sich wie in Tabelle 12 dargestellt zusammen:

Tabelle 12: Energieverbrauch Hafen Bremerhaven⁵⁰

Verbrauch	[GWh/a]	in %
Gesamt	~350	100
Transport	~250	71
Strom	~85	24
Wärme	~15	5

Die Bilanzgrenze für diese Betrachtung ist der Überseehafen Bremerhaven (landseitig bis zur Kaikante). Fahrzeuge, die das Hafengelände verlassen, sind nicht mitbilanziert. Schiffe, mit Ausnahme der dem direkten Hafenbetrieb zugeordneten Schiffe, sind ebenfalls nicht mitbilanziert.

In den folgenden Absätzen werden die wichtigsten Verbrauchsgruppen für Energie in Häfen kurz vorgestellt.

Stromverbrauch

⁴⁹ <https://www.rostock-port.de/hafen-rostock/statistiken>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

⁵⁰ LBST nach (Metzner 2021).

Der Stromverbrauch in Häfen macht etwa ein Viertel des gesamten Energiebedarfs aus. Darin enthalten sind elektrische Antriebe, Containerbrücken, die Versorgung von Kühlcontainern, die Freiflächenbeleuchtung, die elektrische Gebäudeversorgung, Kälteanlagen etc.

Ein wichtiges Thema stellt auch die Landstromversorgung der Schiffe an den Liegeplätzen dar. In deutschen Seehäfen ist die Landstromversorgung für Seeschiffe noch die Ausnahme. Nur in fünf Seehäfen gibt es entsprechende Anlagen (Kiel, Rostock-Warnemünde, Hamburg, Bremerhaven, Lübeck). Während einige Häfen ambitionierte Pläne haben, baut Lübeck bereits zurück⁵¹. Laut einer noch im Gesetzgebungsverfahren befindlichen EU-Verordnung (COM/2021/559 final; AFIR) soll die Landstromversorgung bis 2025 in den Häfen des Kernnetzes der Transeuropäischen Verkehrsnetze TEN eingeführt sein. Das Tempo variiert jedoch zwischen den Ländern und auch den Schifffahrtsbereichen. Flusskreuzfahrer finden öfter Ladestellen als Frachtschiffe⁵².

Es ist nicht zu erwarten, dass einzelne elektrische Verbraucher aus diesem Segment zukünftig mit Wasserstoff oder einem Wasserstoffderivat versorgt werden, sondern direkt an das Stromnetz angebunden werden bzw. bleiben. Daher wird dieses Segment im Rahmen dieser Studie nicht weiter differenziert betrachtet.

Allerdings ist zu beachten, dass möglicherweise die Stromversorgung eines Hafens als Gesamtheit teilweise (oder vollständig) über den Energieträger Wasserstoff oder ein Wasserstoffderivat dargestellt wird. Dies kann der Fall sein, wenn es sich bei dem entsprechenden Hafen um einen Importhafen für Wasserstoff (oder ein Derivat) handelt und über Rückverstromung z. B. in BHKW Strom ins Netz des Hafens eingespeist wird. Dies wird in der späteren Hochrechnung berücksichtigt.

⁵¹ (VDR 2023).

⁵² (DVZ 2021).

Wärmebedarf

Der Wärmebedarf in Häfen ergibt sich hauptsächlich aus der Beheizung der Gebäude. Dazu zählen Büro- und Verwaltungsgebäude, Personenterminals, Lager- und Umschlaghallen, Werkstatthallen etc. Hallen werden häufig mit Dunkelstrahlern beheizt. Überwiegend wird der Wärmebedarf heute über Erdgas abgedeckt, eine zukünftige Versorgung der Heizgeräte mit Wasserstoff ist denkbar.

Hafenumschlaggeräte / Transport

Die Studie „Alternative Antriebe für Hafenumschlaggeräte“⁵³ hat über Umfragen den Bestand von Hafenumschlaggeräten an deutschen See- und Binnenhäfen erfasst und über typische Betriebsparameter die CO₂-Emissionen ermittelt. In Tabelle 13 und Tabelle 14 wird der Bestand an Hafenumschlaggeräten für das Jahr 2021 aufgeführt.

- Portalhubwagen (Van Carrier / Straddle Carrier): Ein spezielles Umschlaggerät für Container, das als Transport- bzw. Flurförderzeug auf Containerterminals eingesetzt wird.
- Automated Guided Vehicle (AGV): Ein AGV ist ein fahrerloses Transportfahrzeug mit eigenem Fahrantrieb, das automatisch gesteuert und kontaktfrei betrieben wird.
- Greifstapler (Reachstacker): Flurförderzeug, das zum Stapeln und Umschlagen von Containern vom Boden oder von und zu Bahnwagen oder von und zu Wechselbrücken dient. Es handelt sich um schwere Radfahrzeuge mit bis zu 50 t Hublast und bis zu 100 t Eigengewicht.
- Leercontainerstapler: Leercontainerstapler gibt es in unterschiedlichen Ausführungen in Bezug auf Tragfähigkeit und Hubhöhe. Geräte, die zwei Container gleichzeitig aufnehmen können und neun Container übereinanderstapeln können, sind am Markt verfügbar. Wie der Name bereits sagt, werden sie zum Handling leerer Container eingesetzt.
- Terminal-Zugmaschine: Zugmaschine für Sattelaufleger, auch Tugmaster genannt. Sie werden z. B. auf Fähr- oder Containerterminals eingesetzt, um Sattelaufleger und Anhänger schnell an oder von Bord zu bewegen oder diese im Hafengelände umzusetzen. Überwiegend werden diese Zugmaschinen von Dieselmotoren angetrieben. Geräte mit Elektro- oder Brennstoffzellenantrieb sind aber am Markt ebenfalls verfügbar.
- Hafenmobilkran: Auch Hafenmobilkräne gibt es in vielfältigen Ausführungen, mit Diesel- oder Elektroantrieb. Sie können ein weites Feld an Einsatzgebieten abdecken, von Stück- oder Schüttgut bis zum Containerhandling. Kräne mit Arbeitsradien > 40 m sind erhältlich.

⁵³ (Ramboll 2022).

Tabelle 13: Bestand Hafenumschlaggeräte in Seehäfen 2021⁵⁴

Gerätetyp	Leistungsmerkmal	Geräteanzahl (Stand: 31.12.2021)
Van / Straddle Carrier		588
Automated Guided Vehicles (AGV)		91
Reachstacker		81
Leercontainerstapler		31
Stapler	6–12 t	531
	> 12 t	114
Terminal-Zugmaschine	4x2	61
	4x4	277
Hafenmobilkran	< 250 kW	13
	251–450 kW	18
	451–650 kW	7
	> 650 kW	33

Tabelle 14: Bestand Hafenumschlaggeräte in Binnenhäfen 2021⁵⁵

Gerätetyp	Leistungsmerkmal	Geräteanzahl (Stand: 31.12.2021)
Van / Straddle Carrier		0
Automated Guided Vehicles (AGV)		0
Reachstacker		77
Leercontainerstapler		31
Stapler	6–12 t	17
	> 12 t	37
Terminal-Zugmaschine	4 x 2	13
	4 x 4	6
Hafenmobilkran	< 250 kW	27
	251–450 kW	9
	451–650 kW	6
	> 650 kW	6

Die resultierenden Energieverbräuche und CO₂-Emissionen sind in Abbildung 12 und Abbildung 13 jeweils für See- bzw. Binnenhäfen aufgeführt. Der CO₂-Ausstoß für Hafenumschlaggeräte liegt für Seehäfen bei 154.971 tCO₂/a und für Binnenhäfen bei 12.391 tCO₂/a im Jahr 2021. Die Energieverbräuche wurden über die CO₂-Emissionen je Energie für Diesel (263,69 gCO₂/kWh) geschätzt. Somit wurden für Hafenumschlaggeräte für Seehäfen 588 GWh/a und in Binnenhäfen 47 GWh/a geschätzt. Van / Straddle Carrier sind der relevanteste Energieverbraucher in Seehäfen mit einem Anteil von ca. 70 % am gesamten Energiebedarf der Umschlaggeräte. Bei Binnenhäfen sind Reachstacker der relevanteste Energieverbraucher mit einem Anteil von ca. 50 % am Energiebedarf aller Umschlaggeräte.

⁵⁴ (Ramboll 2022).

⁵⁵ (Ramboll 2022).

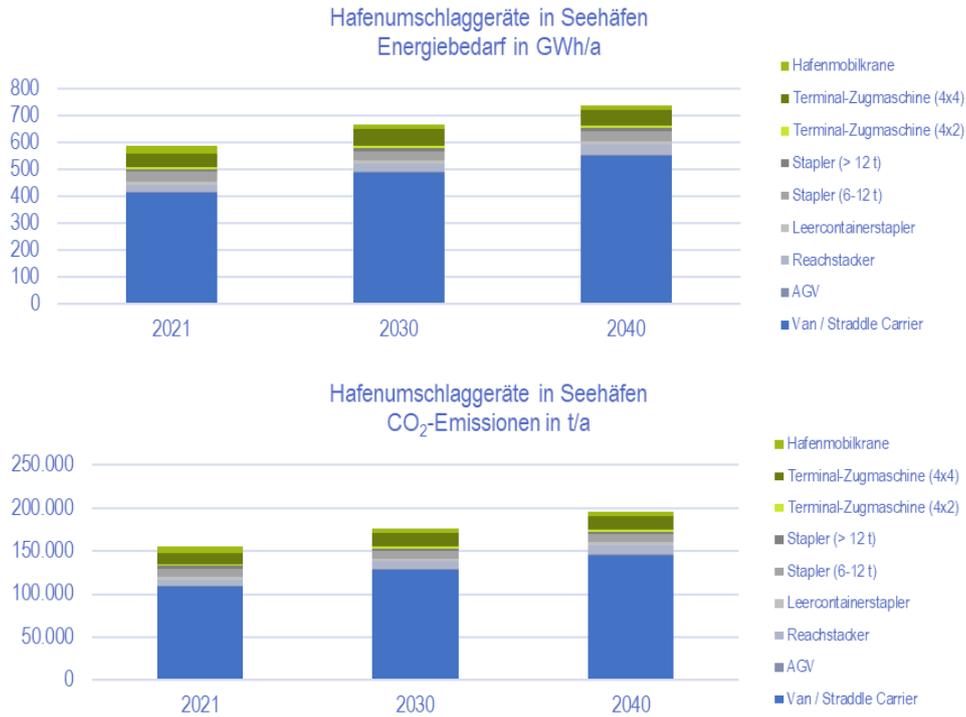


Abbildung 12: Hafenumschlaggeräte - Energieverbrauch und CO₂-Emissionen in Seehäfen⁵⁶

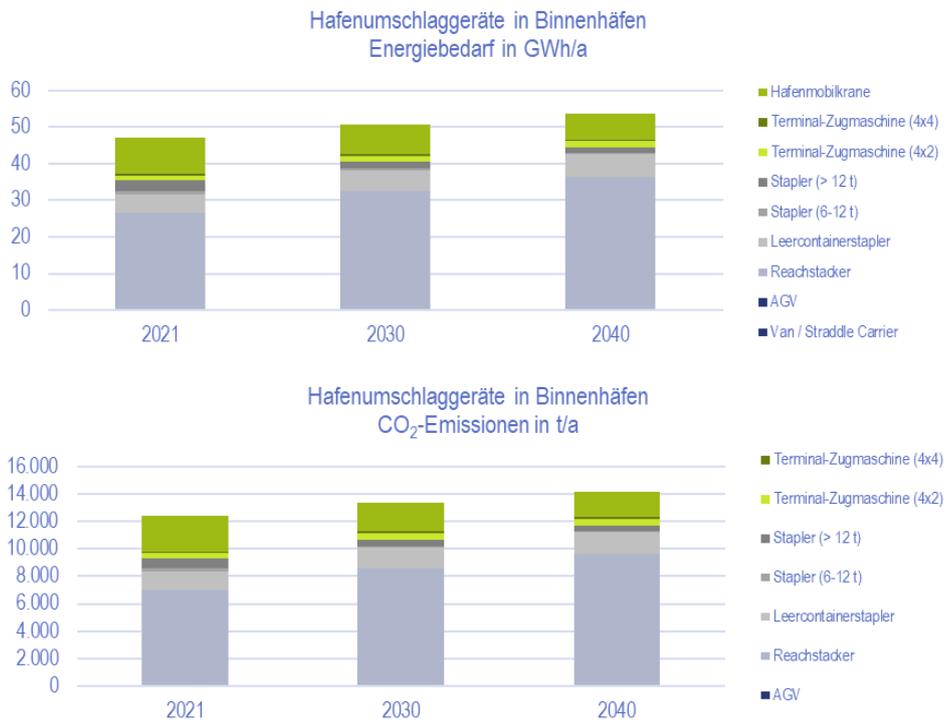


Abbildung 13: Hafenumschlaggeräte - Energieverbrauch und CO₂-Emissionen in Binnenhäfen⁵⁷

⁵⁶ (Ramboll 2022).

⁵⁷ LBST nach (Ramboll 2022).

Hochrechnung des Energiebedarfs auf Basis der Daten von Bremerhaven

Da es keine Statistiken bzw. Daten für den Energiebedarf oder die CO₂-Emissionen der Gesamtheit der deutschen Seehäfen gibt, wurde dieser anhand verfügbarer Informationen für den Hafen Bremerhaven (siehe oben) hochgerechnet. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dies nur eine sehr grobe Abschätzung sein kann, da der Energiebedarf je t Güterumschlag stark von der Art des Güterumschlags abhängt. Da in Bremerhaven überwiegend Fahrzeug- und Containerumschlag stattfindet, kann von einer eher konservativen Schätzung ausgegangen werden. So ergeben sich hochgerechnet auf Basis des Güterumschlags die in Tabelle 15 dargestellten Energieverbräuche für die deutschen Seehäfen.

Tabelle 15: Hochgerechneter Energiebedarf der deutschen Seehäfen

Hafen	Energiebedarf [GWh/a]	in %	Hafen	Energiebedarf [GWh/a]	in %
Gesamt	2.160	100			
Hamburg	832	38,5	Fehmarn	43	2,0
Bremerhaven	350	16,2	Brake (Unterweser)	39	1,8
Wilhelmshaven	177	8,2	Emden	30	1,4
Rostock	166	7,7	Kiel	41	1,9
Lübeck	127	5,9	Wismar	19	0,9
Bremen	95	4,4	Cuxhaven	17	0,8
Brunsbüttel	63	2,9	Nordenham	15	0,7
JadeWeserPort	50	2,3	Sassnitz	11	0,5
Stade	45	2,1	Weitere	37	1,7

Der Energiebedarf der Binnenhäfen wird ebenfalls auf dieser Basis grob abgeschätzt, sodass sich für die deutschen Häfen ein geschätzter Energiebedarf wie in Tabelle 16 dargestellt ergibt.

Tabelle 16: Energiebedarf der deutschen Häfen

Segment	Güterumschlag 2021 [1.000 t/a]	Energiebedarf [GWh/a]
Seehäfen	288.659	2.160
Binnenhäfen	206.724	1.550
Gesamt	495.383	3.710

Aus diesen Daten kann dann unter Anwendung der in Kapitel 3 entwickelten Methodik in Kapitel 4 der Wasserstoffbedarf für Häfen in Deutschland hochgerechnet und entsprechend eingeordnet werden.

1.3.3. Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Derivate

Im Folgenden werden laufende und abgeschlossene Aktivitäten zu Wasserstoff und Derivaten in Häfen betrachtet. Dabei werden nicht nur Projekte mit H₂-Anwendungen in Häfen erwähnt, sondern auch Projekte, die sich mit dem Import, der Erzeugung, der Verteilung oder der Lagerung von Wasserstoff und Derivaten beschäftigen. In Tabelle 17 werden einige relevante H₂-Projekte im Hafenumfeld aufgeführt. Der Fokus liegt dabei auf deutschen Projekten, jedoch werden auch wichtige internationale Projekte mitaufgeführt.

Tabelle 17: Relevante H₂-Projekte im Hafenumfeld

Name	Hafen	Hafen-Typ	Jahr	H ₂ -Anwendung / Bereich	Beschreibung	Projektleitung	Land	Typ
Clean Port & Logistics	Hamburg	Seehafen	laufend	Hafenfahrzeuge	Test von Fahrzeugen mit H ₂ -Antrieb; 2023 H ₂ -Tankstelle für Schwerlastgeräte bspw. Hyster Leercontainerhandler	Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA)	DE	Cluster
Hydrogen Logistics Applications & Distribution (H2LOAD)	Hamburg	Seehafen	2024	Hafenfahrzeuge	Inbetriebnahme von Brennstoffzellen-Schwerlastgerätetypen (z. B. Straddle Carrier, Lkw, Zugmaschinen, Gabelstapler, Leercontainerstapler, Reachstacker, Rangierlok)	Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA)	DE	Pilotprojekt
Hydrogen Port Applications (HyPA)	Hamburg	Seehafen	in Planung	Hafenfahrzeuge/ Schiffe	Bereitstellung von Wasserstofftankstellen für Lokomotiven, Schiffe und Lkw; Bau und Einsatz innovativer wasserstoffbetriebener Schiffe	Hamburg Port Authority	DE	Pilotprojekt
Duisport / enerPort II	Duisport	Binnenhafen	2021–2025	übergreifend	Klimaneutrales Containerterminal (betrieben mit H ₂), Planung einer H ₂ -Pipeline von Rotterdam nach Duisport, Versorgung benachbarter Quartiere	Fraunhofer UMSICHT, Duisburger Hafen AG (duisport)	DE	Pilotprojekt
HyTech Hafen Rostock	Rostock	Seehafen	k. A.	übergreifend	Produktions- und Einsatzmöglichkeiten von grünem Wasserstoff; bis 2026 100 MW Elektrolyse	Rostock EnergyPort Cooperation GmbH	DE	Pilotprojekt
„Green Wilhelms-haven“	Wilhelms-haven	Binnenhafen	bis 2030	Import-Infrastruktur; Erzeugung	Bau eines Importterminals für grünen Ammoniak (bis 2030 soll damit rund ein Zehntel der gesamten H ₂ -Versorgung Deutschlands gesichert werden); 410 MW Elektrolyse	Uniper SE	DE	Pilotprojekt
sH2unter @ports	Hamburg / Bremen	Seehafen	2022–2024	Rangierloks	Implementierung wasserstoffbetriebener Rangierlok; Ziel: flächendeckende Umstellung von Rangierlokomotiven im Bremer und Hamburger Hafen auf H ₂ -Antrieb	Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft an der Hochschule Bremen GmbH	DE	Forschungs- und Entwicklungsprojekt (Verbund)

Name	Hafen	Hafen-Typ	Jahr	H ₂ -Anwendung / Bereich	Beschreibung	Projektleitung	Land	Typ
sMArt Green Ports as Integrated Efficient multimodal hubs (MAGPIE)	u. a. DeltaPort-Niederrhein-häfen Rhein-berg-Orsoy, Voerde, Wesel und Emmerich	Binnen-hafen	2021–2026	übergreifend	Einsatz neuer Kraftstoffe und Energieträger: Produktion, Transport, Speicherung, Verteilung (Kraftstoffe) und Laden (Strom); gefördert durch Horizon 2020	HAVENBEDRIJF ROTTERDAM NV	DE/ EU	Forschungs-projekt
Klimahafen Gelsenkirchen	Gelsen- kirchen	Binnen- hafen	k. A.	übergreifend	Pilotprojekt der Initiative: Umstellung Prozesswärmegewinnung in energie- intensiven Betrieben auf H ₂	c/o Wissenschafts- park Gelsen- kirchen GmbH	DE	Initiative
Hydrogen Lab Bremerhaven	Bremer- haven	Seehafen	bis 2023	Erzeugung und Verteilung	Zusammenspiel von Windenergieanlagen mit der elektrolytischen H ₂ -Erzeugung; u. a. Brennstoffzelle und BHKW, weitere Anlagen zur H ₂ -Anwendung	Fraunhofer- Institut für Windenergie- systeme IWES	DE	Demon- stration
Innovative Hafentechnologien (IHATEC II)	-	See- und Binnen- häfen	2021–2025	-	Forschung und Entwicklung: Entwicklung oder Anpassung innovativer Technologien; Verbesserung des Klima- und Umweltschutzes; € 64 Mio.	BMDV	DE	Förder- programm
WasH2 Emden	Emden	Seehafen	2018–2020	übergreifend	Untersucht die Möglichkeiten, den bisher nicht nutzbaren Strom in Form von „grünem“ Wasserstoff zu speichern und in unterschiedlichen Anwendungen im Hafen zu nutzen	Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG	DE	(Machbar- keits-) Studie
EnergyPort Bremen	Fischerei- hafen Bremer- haven	Seehafen	in Planung	übergreifend	Planung eines EnergyPorts in Bremerhaven; umweltfreundliche Erzeugung, Speicherung und Verteilung von Energie; nachhaltige Mobilität; Energieimport(/-export)	Freie Hansestadt Bremen	DE	Projekt
Grüner Wasserstoff am	Lübeck	Seehafen	in Planung 2019	Erzeugung und Hafenfahrzeuge	Erzeugung von grünem H ₂ (lokaler EE- Strom & Elektrolyse); Betrieb von	Lübeck Port Authority (LPA)	DE	Pilotprojekt

Name	Hafen	Hafen-Typ	Jahr	H ₂ -Anwendung / Bereich	Beschreibung	Projektleitung	Land	Typ
Skandinavienkai als Treibstoff für Umschlaggeräte			(Umsetzung unklar)		Staplern und 1–2 Tugmastern mit H ₂ ; perspektivisch 60 Tugmaster & 30 Gabelstapler mit H ₂			
Shore-to-Store	Los Angeles	Seehafen	2019–2023	Hafenfahrzeuge	Geförderte Fahrzeuge / Ausrüstung: 10 BZ-Lkw, 2 H ₂ -Tankstellen, 2 Elektrotraktoren im Hafen von Hueneme, 2 emissionsfreie BZ-Reachstacker	Port of Los Angeles	USA	Demonstration und Pilotprojekte
H2Ports	Valencia	Seehafen	seit 2019	Hafenfahrzeuge	Test von Wasserstoff-Brennstoffzellen-betriebener Schwerlast-Hafenausrüstung	Fundación Valenciaport	ESP	Demonstration und Pilotprojekte
H ₂ -Aktivitäten im Hafen von Rotterdam	Rotterdam	Seehafen		übergreifend	Verschiedene Projekte zu: Mobilität, Produktion, Import und Pipelines	Port of Rotterdam	NL	Demonstration und Pilotprojekte
Smooth Ports	u. a. Hamburg	See- und Binnenhäfen	2019–2023	übergreifend	Untersucht die Möglichkeit der CO ₂ -Reduktion in Häfen	Stadt Hamburg	EU	Interreg-Projekt
hydrogen + 5G	Qingdao Port	Seehafen	k. A.	Hafenkran	Entwicklung einer wasserstoffbetriebenen Krantechnologie und der dazu erforderlichen Betankungstechnologie	Qingdao Port	CN	Pilotprojekt

Einige Projekte, die für die Implementierung von Wasserstoffanwendungen in Häfen von besonderer Bedeutung sind, werden im Folgenden etwas detaillierter dargestellt.

enerPort II

Besonders herauszustellen ist zunächst das Projekt enerPort II (2021–2025), welches das erste Umsetzungsprojekt zum Thema Wasserstoff im Duisburger Hafen ist. Eine Wasserstoffpipeline von Rotterdam bis in den Duisburger Hafen ist geplant. Kern des Projektes ist jedoch das klimaneutrale Containerterminal, das Mitte des Jahres 2023 in Betrieb genommen werden soll. Außerdem sollen benachbarte Quartiere mit Energie versorgt werden. Das Terminal soll unter anderem mit Wasserstoff betrieben werden.⁵⁸ Die Ergebnisse der enerPort-II-Studie sollen dabei helfen, die Umsetzbarkeit von Wasserstoff im Hafenumfeld in der Praxis besser einschätzen zu können. Die Ergebnisse sind jedoch nicht vor Abschluss dieser Studie zu erwarten. Das Projekt wird mit rund 13 Mio.€ im Rahmen der Technologieoffensive Wasserstoff vom BMWK gefördert.

Clean Port & Logistics

Das Clusterprojekt Clean Port & Logistics (2022–2024), koordiniert durch die HHLA, testet Fahrzeuge mit H₂-Antrieb auf dem Hamburger Containerterminal Tollerort. Es sollen Straddle Carrier, Gabelstapler, Leercontainerstapler, Reachstacker, Terminalzugmaschinen und verschiedene Lkw mit BZ-Antrieb getestet werden. Ziel des Projektes ist, die Erreichung der Marktreife der verschiedenen Geräte zu unterstützen und beschleunigen sowie diese in den Betrieb des Hafens zu integrieren.⁵⁹ Die dazu erforderliche Wasserstofftankstelle soll 2023 ihren Betrieb aufnehmen. An diesem Cluster angedockt sind die Projekte Hydrogen Logistics Applications & Distribution (H₂Load), das sich mit der Inbetriebnahme von Brennstoffzellen-Schwerlastgeräten beschäftigt, und Hydrogen Port Applications (HyPa), das sich mit der Bereitstellung von Wasserstofftankstellen für Lokomotiven, Schiffe und Lkw sowie dem Bau und Einsatz innovativer wasserstoffbetriebener Schiffe befasst.

Wash2Emden

Im Rahmen des bereits abgeschlossenen Projektes Wash2Emden (2018–2020) wurden zunächst verschiedene Anwendungsfelder zu einer Wasserstoffnutzung am Hafen ermittelt: Beispiele hierfür sind Gabelstapler bis 3,5 t, Personenkraftwagen und Kleinbusse, Hafenmobilkrane, Dieselaggregate und die Landstromversorgung von Schiffen über Brennstoffzellen. Weiterhin wurde das Wasserstoffpotenzial am Hafen analysiert: Dieses beträgt für den Bereich Hafenumschlaggeräte (ohne Krananlagen) 17.472,95 m³/a, für die Landstromversorgung der Schiffe 3.581.183,24 m³/a und für den Strombedarf der Gebäude 11.505,15 m³/a⁶⁰. Diese Ergebnisse sowie die zu deren Berechnung angewandte Methodik werden im Kapitel 3 dieser Studie noch näher betrachtet, um die in dieser Studie zugrunde gelegten Ansätze zur Abschätzung der Wasserstoffbedarfe einordnen zu können.

Aktivitäten zu Hafenumschlaggeräten

In Tabelle 20 werden Wasserstoffaktivitäten zu Hafenumschlaggeräten aufgeführt. Es werden nicht nur reine Wasserstoffsysteme, sondern auch Systeme mit Wasserstoff-Derivaten aufgeführt. Der

⁵⁸ <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2021/enerportII.html>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

⁵⁹ <https://hydrogenports.org/>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

⁶⁰ (Umsicht 2021).

Zentralverband der deutschen Seehafenbetriebe⁶¹ nennt Geräte, bei denen Wasserstoff potenziell eingesetzt werden kann oder die Erprobung schon läuft. Diese sind Portalhubwagen (Van Carrier / Straddle Carrier), Greifstapler (Reachstacker), Zugmaschinen für Sattelaufleger (Tugmaster), Gabelstapler mit hohen Traglasten (16 t) und Transporter. Darüber hinaus gibt es bereits ein kommerzielles AGV mit BZ-Antrieb.

Aktivitäten zu Rangierlokomotiven

An dieser Stelle ist zunächst das Projekt sh2unter@ports zu nennen. Dieses Projekt, das vom 01.01.2023 bis zum 31.05.2024 läuft und ein gesamtes Projektvolumen von € 1,2 Mio. umfasst, widmet sich der Aufgabe, Rangierlokomotiven in Bremer und Hamburger Hafengebieten auf den Betrieb mit Wasserstoff umzustellen. Die Partner bremenports, evb Logistik, Alstom, die Hamburg Port Authority (HPA) sowie die Hochschulen Bremen und Bremerhaven wollen die Voraussetzungen und Anforderungen erforschen, die Bedingungen für die Betankung mit Wasserstoff ermitteln sowie Sicherheits- und Rechtsfragen klären. Ein konkreter Umsetzungsplan soll erstellt werden.⁶²

Darüber hinaus wird berichtet⁶³, dass Alstom bereits 2024 eine Rangierlokomotive mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor kommerziell auf den Markt bringen will und somit schrittweise Dieselloks ersetzt werden können.

Demgegenüber setzt das polnische Unternehmen Pesa auf den Brennstoffzellenantrieb für Rangierlokomotiven. Ein erster Prototyp wurde auf der TRAKO 2021 International Railway Fair vorgestellt und soll dieses Jahr auf einer Raffinerie in Betrieb gehen.

⁶¹ (ZDS 2021).

⁶² <https://sh2unter.com/>, zuletzt abgerufen 17.05.2023.

⁶³ <https://www.golem.de/news/diesel-ersatz-rangierloks-auf-wasserstoff-2212-170165.html>, zuletzt abgerufen am 17.05.2023.

Tabelle 18: Aktivitäten Hafenumschlaggeräte⁶⁴

Projekt / Hersteller / Modell	Hafen	Jahr	Fahrzeug-Typ	Antriebstyp	Typ
Gaussin (AGVH2)	-	-	AGV	Brennstoffzelle	kommerziell
Clean Port and Logistics / Hyster	Hamburg	2022	Leercontainerhandler	Brennstoffzelle	Demonstration
Letaq NH3 Port Equipment	-	-	Leercontainerstapler	Hybridsystem (Verbrennungsmotor, Batterie und Elektromotor)	kommerziell
H2ports / Hyster	Valencia	2021	Reachstacker	Brennstoffzelle	Demonstration
Letaq NH3 Port Equipment	-	-	Reachstacker	Hybridsystem (Verbrennungsmotor, Batterie und Elektromotor)	kommerziell
HHLA Wasserstoffstapler / Still (R 60-25 Fuel Cell)	Hamburg	2008	Stapler	Brennstoffzelle	Demonstration
Hyster	-	-	Stapler	Brennstoffzelle	kommerziell
Linde	-	-	Stapler	Brennstoffzelle	kommerziell
Toyota	-	-	Stapler	Brennstoffzelle	kommerziell
Gaoncell	-	-	Stapler	Direktmethanolbrennstoffzelle	kommerziell
Letaq NH3 Port Equipment	-	-	Stapler	Hybridsystem (Verbrennungsmotor, Batterie und Elektromotor)	kommerziell
CMB.TECH	Antwerpen (ATS)	2023	Straddle Carrier	Dual-Fuel-Verbrennungsmotor	Test/Demonstration
H2ports / Atena	Valencia	2019–2022	Terminalzugmaschine	Brennstoffzelle	Demonstration
Terberg (YT203-H2)	Rotterdam / Antwerpen	2020	Terminalzugmaschine	Brennstoffzelle	Demonstration
Clean Port and Logistics / Hyster	Hamburg	2022	Terminalzugmaschine	Brennstoffzelle	Demonstration

⁶⁴ Basierend auf (Ramboll 2022) sowie <https://fuelcellsworld.com/news/antwerp-terminal-services-ats-and-cmb-tech-launch-worlds-first-hydrogen-dual-fuel-straddle-carrier/>, zuletzt abgerufen am 17.05.2023, sowie <https://www.hyster.com/de-de/europe/warum-hyster/pressemitteilungen/brennstoffzellentechnologie-im-hafen-hamburg-hyster-liefert-leercontainerhandler-und-terminalzugmaschine-mit-wasserstoffantrieb-an-die-hhla/>, zuletzt abgerufen am 17.05.2023.

1.4. Schiffbau und Zulieferer

1.4.1. Zusammenfassung

Schiffbau und ihre Zulieferer haben einen Gesamtenergiebedarf von etwa 1.100 GWh/a und bilden damit innerhalb der vier hier betrachteten Teilbranchen die drittgrößte Gruppe. Wasserstofflösungen sind in der Zulieferbranche unabhängig von der maritimen Branche als wichtiger Teil eines Dekarbonisierungspfades anerkannt und werden teilweise aktiv verfolgt (siehe Stahlbranche oder Gießereien). Technische Anwendungsmöglichkeiten bei Werften liegen im Bereich Umschlaggeräte und Logistik sowie existierender Spezialanwendungen (Hydridspeicherherstellung), größtes Entwicklungspotenzial in den Werften hat die stationäre Energieerzeugung in Blockheizkraftwerken (BZ oder Turbine) als Erdgasersatz. Die Schiffbauindustrie verhält sich jedoch insgesamt abwartend bezüglich der Anwendung von Wasserstoff und strebt aktuell vornehmlich eine Elektrifizierung seiner Prozesse an.

1.4.2. Überblick und Definitionen

1.4.2.1. Teilbranchenüberblick, Abgrenzung und Methodik

Eine Abgrenzung der Branche wird im Wesentlichen anhand der Zweisteller-Definition der Wirtschaftszweige des Statistischen Bundesamtes von 2008 vorgenommen. Die Analyse der Vorleistungen / Zulieferer bezieht sich auf die Input-Output-Rechnung aus dem Jahr 2015 (2019 überarbeitet)⁶⁵, welche die aktuellste Betrachtung über alle Wirtschaftszweige / Gütergruppen hinweg ist. Zusätzlich wurden Aussagen durch Interviews mit relevanten Akteuren und Fachleuten verifiziert und gespiegelt. Das vorliegende Teilkapitel beschäftigt sich NICHT mit den Aktivitäten des Schiffbaus in Bezug auf die Umsetzung alternativer Antriebsmöglichkeiten bei Schiffen (dazu siehe Kapitel 1.2).

Schiffbau

Der Schiffbau in Deutschland umfasst laut Branchenverband etwa 130 Betriebe⁶⁶, darunter fallen sowohl Neubauwerften, Reparatur- und Umbauwerften sowie Betriebe, die Großkomponenten (Rumpfelemente) für Seeschiffe produzieren. Das Statistische Bundesamt zählt im Wirtschaftszweig 30.1 (Schiff- und Bootsbau) 83 Werften mit über 20 Mitarbeitenden⁶⁷. Betriebe mit weniger als 20 Mitarbeitenden sind vornehmlich Reparaturbetriebe und liegen nicht im Fokus der Betrachtungen in dieser Studie.

Für Deutschland ist dabei insbesondere die Spezialisierung auf den Spezialeschiffbau charakteristisch, der über 80 % der abgelieferten Schiffe entspricht⁶⁸ und sich insbesondere durch seine Ausrüstungsintensität sowie geringe Stückzahl kennzeichnet. Wesentliche Akteure im Schiffbau sind die MEYER Gruppe, thyssenkrupp Marine Systems, Fr. Lürssen Gruppe, Fr. Fassmer GmbH sowie FSG Flensburg, die zusammen bereits einen Großteil des Branchenumsatzes von 5–6 Mrd. Euro⁶⁹ ausmachen.

⁶⁵ (DESTATIS 2020).

⁶⁶ <https://www.vsm.de/de/die-branche/was-ist-schiffbau-und-meerestechnik>, zuletzt abgerufen am 17.05.2023.

⁶⁷ (DESTATIS 2019).

⁶⁸ (VSM 2021).

⁶⁹ (VSM 2021).

Zulieferer

Die Definition der maritimen Branche und insbesondere ihrer Zulieferer unterliegt keiner klaren Abgrenzung und ist allgemein anerkannt herausfordernd⁷⁰. Außerdem sind viele Betriebe nicht ausschließlich auf Anwendungen in der maritimen Branche spezialisiert und insofern nur bedingt direkt einer maritimen Branche als Ganzes zuzuordnen. Auch aufgrund der vergangenen (Outsourcing-) Strategien ist heute ein Großteil der Wertschöpfung in Zulieferbetrieben ausgelagert, was sich auch in der Verteilung der Beschäftigungszahlen widerspiegelt⁷¹ sowie des Umsatzes von 12,8 Mrd. Euro⁷² (vs. 5–6 Mrd. beim Schiffbau direkt).

Die Zulieferindustrie wird in dieser Arbeit definiert über diejenigen Wirtschaftszweige mit signifikantem Anteil an Vorleistungen für den sonstigen Fahrzeugbau (WZ 30)⁷³ und umfasst ausschließlich Betriebe aus Deutschland. Betriebe, die selbst dem Schiffs- und Bootsbau zugerechnet werden können und einen Großteil der Vorleistungen bereitstellen, werden NICHT als Teil der Zulieferer betrachtet, sondern im entsprechenden Abschnitt über Schiffbau.

Damit bleiben laut Input-Output-Tabelle des Statistischen Bundesamtes mit signifikanten Anteilen ($\geq 0,6\%$), die Vorleistungen bereitstellen:

- WZ 16 Holz, Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren
- WZ 24 Metallerzeugung und -erstbearbeitung (inkl. z. B. von Gießereien mit für maritime Branche charakteristischer Produktion von Schiffspropellern sowie Großmotorblöcken)
- WZ 25 Metallverarbeitung
- WZ 27 Elektrische Ausrüstungen
- WZ 28 Maschinenbau
- Dienstleistend:
WZ 33 Reparatur von Maschinen, WZ 45–47 Handelsdienstleistungen, WZ 62–63 IT, WZ 68+71 Grundstück und Architektur, WZ 69–70 Beratung, WZ 78 Arbeitsvermittlung, WZ 80–82 Wachdienste

Ein Großteil der Vorleistungen wird durch das verarbeitende Gewerbe⁷⁴ erbracht. Im Folgenden werden insbesondere die Betriebe aus Stahl, Metall und Maschinenbau betrachtet, da hier besonders energieintensive Prozesse vorliegen (können) und insofern ein vergleichsweise hohes Potenzial für Wasserstoffanwendung zur Dekarbonisierung vorhanden ist. Holz(-verarbeitung) sowie elektrische Ausrüstung sind NICHT eingeschlossen. Auch Dienstleistungen, beispielsweise Reparaturservices, sind nicht Teil der Betrachtung.

⁷⁰ (Balance 2014) und (IFW 2020).

⁷¹ (IG Metall 2022).

⁷² <https://www.vsm.de/de/die-branche/zahlen-und-fakten-0>, zuletzt abgerufen am 16.5.2023.

⁷³ Die Annahme, dass die Zulieferindustrie für den sonstigen Fahrzeugbau eine ähnliche Struktur aufweist wie die spezifisch für Schiff- und Bootsbau, konnte sich durch eine öffentlich verfügbare Eigenanalyse der Meyer Werft bestätigen lassen, siehe (CWS 2017).

⁷⁴ Plausibilisierung durch Eigenanalyse Meyer Werft, siehe (CWS 2017).

1.4.2.2. Übersicht Struktur Energieverbrauch

Schiffbau

Vereinfachend lässt sich der Schiffbau durch folgende wesentliche Energieverbraucher charakterisieren:

1. Schweiß-, Schleif- und Schneidprozesse
2. Raumwärme (z. B. zur Verhinderung von Stahlausdehnung)
3. (Schwerlast-)Flurförderzeuge (z. B.: „Scheuerle“)
4. Probefahrten

Außerdem zeigen Werften eine relativ starke Schwankung des Energiebedarfs über das Jahr, die durch die geringe Stückzahl und damit vornehmlich sequenzielle Produktion sowie winterliches Nachheizen bedingt wird. Weitere Energieverbraucher entsprechen denen von durchschnittlichen Industriebetrieben und umfassen beispielsweise Beleuchtung, Kompressoren oder Absauganlagen.

Dieser Energiebedarf wird heute durch Netzstrom, Erdgas und teilweise auch Fernwärme gedeckt. TKMS in Kiel⁷⁵ betreibt zusätzlich zwei erdgasbetriebene BHKW mit einer Leistung von jeweils 250 kW, deckt damit jedoch nur einen Teil des Gesamtenergieverbrauchs von ca. 60 GWh/a. Andere Werften erhöhen die Effizienz ihrer Energieversorgung durch Einsatz von Brennwertkesseln, die bei sinnvoller Schaltung ebenfalls sehr hohe Wirkungsgrade erreichen können.

Das Statistische Bundesamt gibt einen Energieverbrauch für den WZ 30 Sonstiger Fahrzeugbau von 3.150 GWh/a an. Um aus diesem Wert eine Abschätzung über den Energiebedarf des Schiff- und Bootsbaus in Deutschland zu erhalten, wurde der Wert mit dem Anteil des WZ 30.1 innerhalb des WZ 30 multipliziert. Aktuelle Daten⁷⁶ ergeben hierfür einen Anteil am Umsatz von etwa 10 %. Damit ergibt sich – unter Annahme einer ähnlichen Umsatzstruktur über alle Betriebe innerhalb des WZ 30 – für den Schiff- und Bootsbau in Deutschland ein Energiebedarf von etwa:

Energiebedarf Schiffbau: 315 GWh/a

Dieser Wert erscheint plausibel, wenn man typische Verbrauchswerte der beiden größten deutschen Werftbetriebe betrachtet: die Meyer Werft⁷⁷ verursacht ca. 80-90 GWh/a⁷⁸ für Strom und Gas (ohne Probefahrten) und TKMS ca. 55–60 GWh/a⁷⁹ (beide machen zusammen auch knapp 50 % der Beschäftigten der Branche aus⁸⁰). Zusätzlich lässt sich der Wert plausibilisieren durch wissenschaftliche Literatur⁸¹ für ausländische Werften, die eine Größenordnung von etwa 522 kWh pro Tonne verarbeitetem Stahl beschreibt (Beispiel Kreuzfahrtschiff mit etwa 40.000 t Stahl ergibt Bedarf von etwa 21 GWh pro Schiff).

⁷⁵ (Umlaut 2021).

⁷⁶ Basierend auf (DESTATIS 2019).

⁷⁷ (Meyer Werft 2016).

⁷⁸ Bei Annahme einer Produktion von durchschnittlich 300.000 BRZ pro Jahr, Abschätzung nach (VSM 2021).

⁷⁹ (TKMS 2023) thyssenkrupp Marine Systems GmbH, Sustainability Brochure, 2023.

⁸⁰ (IG Metall 2022).

⁸¹ (Vakili 2022).

Zulieferer

Die Ermittlung der Energiebedarfe, die durch die maritime Branche bei den Zulieferern verursacht wird, erfolgt über den relativen Anteil des WZ 30 am Output der jeweiligen liefernden Wirtschaftszweige⁸², basierend auf Input-Output-Tabellen des Statistischen Bundesamtes. Dabei ist (ebenfalls) angenommen, dass sich die Anteile im sonstigen Fahrzeugbau etwa ähnlich über die Branchen Flugzeugbau, Schienenfahrzeugbau und Schiffbau verteilen⁸³. Obwohl die maritimen Abnehmer nur „Nachfrage“ im Promillebereich erzeugen, ergeben sich signifikante Energieverbrauchszahlen aufgrund der vergleichsweise energieintensiven Natur der Stahl-, Metallverarbeitungs- und Maschinenbauprozesse. Mit Hinblick auf Wasserstoffanwendungen sind insbesondere die Anteile der heute durch Erdgas bereitgestellten Energie relevant, die in Tabelle 19 ebenfalls heruntergerechnet für den Anteil des Schiff- und Bootsbaus angegeben sind.

Tabelle 19: Energiebedarfe relevanter Wirtschaftszweige innerhalb der maritimen Zulieferindustrie (eigene Berechnung auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes)

	WZ 24: Metallherzeugung und -bearbeitung	WZ 25: Herstellung von Metallzeugnissen	WZ 28: Maschinenbau
Gesamtenergieverbrauch ⁸⁴	263.000 GWh/a	25.000 GWh/a	21.000 GWh/a
Erdgasverbrauch ⁸⁴	37.000 GWh/a	10.000 GWh/a	7.000 GWh/a
Anteil Schiff- und Bootsbau ⁸²	0,3 %	0,5 %	0,2 %
Energiebedarf bedingt durch Nachfrage bei Schiff- und Bootsbau	659 GWh/a	114 GWh/a	30 GWh/a
Erdgasbedarf bedingt durch Schiff- und Bootsbau	111 GWh/a	50 GWh/a	14 GWh/a

1.4.3. Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Derivate

Schiffbau

Die Anwendung von Wasserstoff wird in Werften aktuell vornehmlich im Zusammenhang der gebauten Produkte, insbesondere als Schiffsantrieb verfolgt. Zwar wird in der wissenschaftlichen Literatur⁸⁵ Wasserstoff auch als Teil einer Komplettlösung für die Stromversorgung diskutiert, jedoch bieten sich nur wenige Prozesse im Schiffbau unmittelbar für eine Umstellung auf Wasserstoff an. EU-Projekte⁸⁶, die „Werften der Zukunft“ entwerfen, zeigen ebenfalls keinen Fokus auf Anwendung von Wasserstoff in Wertprozessen, sondern vielmehr auf Effizienzerhöhung, alternative Materialien etc.

⁸² Z. B.: WZ 25 erzeugte einen Output von insgesamt 71.242 Mio. EUR, wovon WZ 30 3.187 Mio. EUR erzeugte. Mit einem Anteil von 10 % am WZ 30 „verursacht“ der Schiff- und Bootsbau somit etwa 0,5 % am Aufkommen von WZ 25.

⁸³ Plausibilisierung durch Eigenanalyse Meyer Werft, siehe (CWS 2017).

⁸⁴ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Verwendung/Tabellen/kohle-erdgas-strom.html>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

⁸⁵ (Vakili 2023).

⁸⁶ <https://www.waterborne.eu/projects>, zuletzt abgerufen am 12.05.2023.

Folgende Informationen zu nationalen und internationalen Aktivitäten im Zusammenhang mit Wasserstoff sind öffentlich verfügbar:

- ANWENDUNG: Spezialanwendungen im Bereich Unterseeboote
- Hydridspeicherproduktion bzw. -aktivierung
- Testanlagen
- ANKÜNDIGUNG: Lürssen⁸⁷ zusammen mit mtu/Rolls-Royce
Methanol-Verbrenner BHKW (Demo) zur Bereitstellung von Strom und Wärme für die Werft
„Wir wollen mit Rolls-Royce zusammenarbeiten, um ein stationäres methanolbetriebenes Blockheizkraftwerk in einer unserer Werften als Demonstrator für unsere Kunden zu betreiben.“
- PRÜFUNG: Umstellung BHKW auf Wasserstoff TKMS⁸⁸
- PROJEKT: Werft „Astilleros de Mallorca“⁸⁹ auf Mallorca testet Energieversorgung mit „Brennstoffzellen-BHKW“ im Kontext GREEN HYSLAND⁹⁰ (EU Fünfjahres-Projekt seit 2021)
- PRÜFUNG: Monaco Marine⁹¹ berichtet von Plänen zu wasserstoffbetriebenen Fertigungslinien

Zulieferer

Im Folgenden wurden ausgewählte deutsche maritime Zulieferer auf Wasserstoffaktivitäten überprüft (Tabelle 20). Dabei zeigt sich, dass zwar über die Hälfte der betrachteten Unternehmen Wasserstoff und Derivate als Geschäftsfeld betrachten und in größten Teilen bereits aktiv Produkte dafür entwickeln, jedoch keines der Unternehmen über Wasserstoff als Teil der eigenen Dekarbonisierungsstrategie berichtet.

Tabelle 20: Aktivitäten im Bereich Wasserstoff oder Derivate ausgewählter (Schiffbau-)Zulieferer aus Deutschland (ohne Stahlindustrie), basierend auf Informationen der jeweiligen Websites

Zulieferer	Branche	Aktivität	Kommentar
Baumüller	Antriebe und Energieerzeugung	Ja	Elektroantriebe auch direkt mit H ₂ -BZ
Becker Marine*	Antriebe und Energieerzeugung	Nein	Bosch Rexroth schließt Partnerschaft mit Maximator Hydrogen zum Aufbau von weltweit 4.000 Wasserstofftankstellen bis 2030.
Bosch Rexroth	Antriebe und Energieerzeugung	Ja	
Caterpillar Marine Power Systems	Antriebe und Energieerzeugung	Ja	Methanol-betriebene Verbrennungsmotoren

⁸⁷ <https://www.mtu-solutions.com/eu/de/pressreleases/2022/rolls-royce-and-luerssen-to-focus-on-methanol-propulsion-for-lar.html>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

⁸⁸ (TKMS 2023).

⁸⁹ <https://www.mallorcamagazin.com/nachrichten/wirtschaft/2021/01/03/86753/werftenindustrie-auf-mallorca-pruft-energiegewende-hin-grunem-wasserstoff.html>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

⁹⁰ <https://greenhysland.eu/about-green-hysland/>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

⁹¹ <http://www.onboardmagazine.fr/shipyards-going-green/>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

Zulieferer	Branche	Aktivität	Kommentar
GEA Westfalia Separator	Hilfssysteme	Nein	
Hatz	Antriebe und Energieerzeugung	Nein	
Hamann	Hilfssysteme	Nein	
Heinzmann	Antriebe und Energieerzeugung	Ja	Neueste Entwicklung: System für Methanol-Einspritzung
KSB	Hilfssysteme	Ja	Bedienen alle wesentlichen Technologien der Wasserstoffherzeugung
KS Large Bore Pistons Germany	Antriebe und Energieerzeugung	Ja	Material der Kolben ist geeignet für Wasserstoff- und Derivateverbrennungsmotoren
Leistritz Pumpen	Hilfssysteme	Nein	
Mahle Behr Industry	Hilfssysteme	Ja	Weitet Anwendungs-Portfolio für Wasserstoff aus, verfügt über ein breites Portfolio für Brennstoffzellensysteme und treibt die Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren zur Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff voran
MAN Energy Solutions	Antriebe und Energieerzeugung	Ja	Herstellung des weltgrößten Methanol-Zweitakt-Motors sowie PEM-Elektrolyseure über H-TEC
Mecklenburger Metallguss*	Antriebe und Energieerzeugung	Nein	
Minimax	Hilfssysteme	Nein	
mtu/Rolls-Royce	Antriebe und Energieerzeugung	Ja	Erfolgreicher Test von Motor, der mit 100 % Wasserstoff läuft, mtu-Aggregate und Blockheizkraftwerke sollen für 100%ige Wasserstoffnutzung weiterentwickelt werden
Neuenhauser Kompressoren	Hilfssysteme	Nein	
Noris Marine	Antriebe und Energieerzeugung und Hilfssysteme	Nein	
Renk	Antriebe und Energieerzeugung	Ja	Herstellung von Komponenten im Bereich Wasserstoff
Reintjes*	Antriebe und Energieerzeugung	Nein	
Saacke	Hilfssysteme	Ja	H ₂ -ready Brenner (Jahrzehnte Erfahrung)
Sauer & Sohn	Hilfssysteme	Ja	Sauer Compressors (gehört zu J.P. Sauer & Sohn Maschinenbau GmbH) stellt Wasserstoff-Kompressoren her
Schaller Automation	Antriebe und Energieerzeugung	Ja	Ihr Dual-Fuel-Motor-Konzept wird dazu befähigt, bis zu 30 % Wasserstoff dem Kraftstoff LNG beizumischen
Siemens Energy	Antriebe und Energieerzeugung und Hilfssysteme	Ja	Produziert u. a. PEM-Elektrolyseure

Zulieferer	Branche	Aktivität	Kommentar
Schottel*	Antriebe und Energieerzeugung	Ja	Verbrennungsmotoren, die Wasserstoff in Kombination mit Diesel verbrennen
Voith Schneider Propulsion*	Antriebe und Energieerzeugung	Ja	Plug & Drive H ₂ Storage System für Küstenschiffe
Wärtsilä	Antriebe und Energieerzeugung	Ja	Stellt u. a. wasserstoffbetriebene Motoren her
ZF Marine	Antriebe und Energieerzeugung	Nein	Brennstoffzellenentwicklung für schwere NFZ beteiligt

*beliefert (fast) ausschließlich maritime Branche

1.5. Meerestechnik

1.5.1. Zusammenfassung

Die Meerestechnik als sehr heterogene und forschungslastige Teilbranche kann potenziell eine Vielzahl verschiedener Anwendungen für Wasserstoff erzeugen (z. B. im Bereich Brennstoffzellensystem für dezentrale, modulare Stromversorgung für Endverbraucher aller Art), die jedoch auch zusammengenommen keine signifikanten Bedarfe erwarten lassen; insbesondere da die Offshore-Industrie in Deutschland nur eine untergeordnete Rolle spielt.

1.5.2. Überblick und Definitionen

1.5.2.1. Teilbranchenüberblick, Abgrenzung und Methodik

Die Meerestechnik umfasst sowohl kommerzielle als auch wissenschaftliche Aktivitäten in den Bereichen Energie-, Rohstoff- und Nahrungsgewinnung aus dem Meer⁹². International ist dabei der wichtigste Wirtschaftsbereich die Gewinnung von Öl und Erdgas durch Offshore-Plattformen. Öl- und Erdgasgewinnung spielen in Deutschland jedoch eine untergeordnete Rolle, da nur eine Plattform in der Nordsee betrieben wird. Zunehmend ist die Gewinnung von Strom und Wasserstoff durch Windfarmen (und Offshore-Elektrolyseure) ein Bereich, der innerhalb der Meerestechnik an Bedeutung gewinnt. Da es sich hier jedoch im Wesentlichen um energieerzeugende Aktivitäten handelt, werden diese im vorliegenden Bericht nicht weiter analysiert (Fokus Wasserstoffbedarf). Auch Aquakultur und Fischerei werden in dieser Arbeit nicht betrachtet sowie alle Aspekte rund um (Überwasser)-Versorgungsschiffe, die im Kontext von Schiffsantrieben im Kapitel 1.2 diskutiert werden. Die vorliegende Analyse betrachtet daher Offshore-Verbraucher, Unterwasserfahrzeuge und weitere Kleinanwendungen.

1.5.2.2. Übersicht Struktur Energieverbrauch

Aufgrund der heterogenen Struktur der Teilbranche Meerestechnik sind keine Überblickszahlen für den Energieverbrauch verfügbar. Innerhalb der Branche sind Ölplattformen jedoch als größte Einzelverbraucher zu identifizieren, die auch in Deutschland den größten singulären Verbraucher stellen:

⁹² <https://www.vsm.de/de/die-branche/was-ist-schiffbau-und-meerestechnik>, zuletzt abgerufen am 17.05.2023.

die DEA-Wintershall-Plattform Mittelplate⁹³ mit ihrer Landstation in Dieksand. Diese hat einen Verbrauch von 70–75 GWh pro Jahr und ist seit 2021 vollständig durch zertifiziert erneuerbaren Strom versorgt.

Weitere Energieverbräuche werden durch Forschungs-U-Boote wie das MARUM SEAL mit einer Antriebsleistung von 1,5 kW erzeugt. Zusätzlich erzeugen die Versorgungsschiffe der Offshore-Aktivitäten einen Energiebedarf im Bereich Antriebe, die jedoch im Kapitel 1.2 behandelt werden.

1.5.3. Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Derivate

Die Meerestechnik als Teilbranche kann in Zukunft eine wesentliche Rolle im Bereich Wasserstoff spielen. Da diese jedoch hauptsächlich im Bereich der Wasserstoffherzeugung liegt, bleiben auf Seite der möglichen Wasserstoffbedarfe nur wenige erwähnenswerte Aktivitäten, die wir im Folgenden auflisten:

- ENTWICKLUNG: CIAM – Cooperative Development of a Comprehensive Integrated Autonomous Underwater Monitoring Solution⁹⁴
- Rosen Gruppe, FormLED GmbH, TU Berlin, Innomar, BalticFuelCells GmbH, HafenCity University Hamburg, Universität Freiburg, GEOMAR
- Entwicklung autonomer Unterwasserfahrzeuge (AUVs), die in der Lage sind, selbstständig Inspektionsmissionen mit einer Fahrtstrecke von 500 km durchzuführen (Vorteil Brennstoffzelle), unter anderem AUV mit Brennstoffzellenantrieb für lange Betriebs-/Tauchzeiten
- DEMONSTRATIONSPROJEKT: MUM – Modifiable Underwater Mothership
- TKMS, Fraunhofer FKIE, EvoLogics, DLR, Universität Rostock, TU Berlin
- Entwicklung eines zivilen Groß-U-Boots zur Erkundung und Nutzung der Weltmeere mit 80 kW Brennstoffzellenantrieb⁹⁵
- ANWENDUNG: Eine Handvoll Forschungs-AUVs (Beispiel: MARUM SEAL), Leistung ca. 1,5 kW⁹⁶
- ANKÜNDIGUNG: Mittelplate-Versorgungsschiffe⁹⁷ (siehe auch Schiffbau)

⁹³ (Wintershall 2020).

⁹⁴ <https://robotik.dfki-bremen.de/de/forschung/projekte/ciam/>, zuletzt abgerufen am 10.05.2023.

⁹⁵ <https://mum-project.de/>, zuletzt abgerufen am 10.05.2023.

⁹⁶ <https://www.marum.de/Infrastruktur/Fahrzeug-2.html>, zuletzt abgerufen am 28.2.23.

⁹⁷ <https://wintershalldea.com/de/newsroom/wasserstoff-mittelplate>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

2. BEWERTUNG & PERSPEKTIVEN DER H₂-ANWENDUNG IN MARITIMEN TEILBRANCHEN

2.1. Zusammenfassung

In der **Schifffahrt** werden für lange Routen, z. B. nach Asien, vor allem erneuerbares Methanol, aber auch Flüssigwasserstoff und Ammoniak betrachtet. Die Herausforderungen sind hier die hohen Anforderungen an die Energiespeicherung und Systemleistungsdichte für die Energieversorgung, internationale Verfügbarkeit und Preise von erneuerbaren Kraftstoffen sowie die Weiterentwicklung der Regulatorik.

Für Schiffsantriebe in Europa und Deutschland (entlang von Küsten und Flüssen) bietet der Aufbau einer Infrastruktur für Wasserstoff attraktive Synergien, wie auch Industriestandorte und Häfen für das Bunkern von Methanol. Brennstoffzellen können insbesondere für Binnenschiffe bzw. Seeschiffe entlang der Küsten Vorteile für die Elektrifizierung und die Energieversorgung der Schiffe mittels redundanter und modularer Systeme bieten wie auch beim Betrieb von Wasserstoff lokal Nullemissionen (CO₂, Luftschadstoffe, Lärm) ausstoßen.

Für **Häfen** bietet der Einsatz von erneuerbarem Wasserstoff und Methanol mit Brennstoffzellen die interessante Option zur Elektrifizierung von (großen) Umschlaggeräten und der stationären Strom- und Wärmeerzeugung (Erdgasersatz). Hier haben Brennstoffzellen in einigen Anwendungen bereits einen hohen technischen Reifegrad erreicht.

Schiffbau ist ein Industriezweig, dessen Prozesse sich nicht unmittelbar für Wasserstoff anbieten. Einige Spezialanwendungen erzeugen auch heute schon Wasserstoffbedarfe. Mittel- bis langfristig bietet aber die Umsetzung von kombinierter Strom- und Wärmeerzeugung mit Wasserstoff Möglichkeiten. Die Zulieferer werden Wasserstoff aktiv und auch bereits mittelfristig umsetzen, jedoch nicht getrieben durch die Nachfrage aus der maritimen Branche.

Die **Meerestechnik** als sehr heterogene Teilbranche bietet eine Vielzahl von möglichen Kleinanwendungen für Wasserstoff vornehmlich als Antriebe oder zur dezentralen Energieversorgung. Da durch die Forschungslastigkeit nicht immer die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund steht, ist über Einzelanwendungen hinaus kein relevanter „Massenmarkt“ zu erwarten. Somit ist kurz- bis mittelfristig nicht von signifikanten Wasserstoffbedarfen auszugehen. Langfristig ist die Entwicklung möglicher PtX-Anlagen⁹⁸ auf See zu beobachten.

2.2. Methodik / Vorgehen

Aufbauend auf der Analyse des Status quo in den maritimen Teilbereichen (siehe Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Derivate in den Kapiteln 1.2.3, 1.3.3, 1.4.3, 1.5.3) erfolgt in diesem Kapitel 2.2 eine Diskussion und erste Einschätzung der Perspektiven für die kurz- (bis 2025), mittel- (bis 2030) und langfristige (bis 2045) Anwendung von erneuerbarem Wasserstoff (und seiner Derivate).

Für die maritimen Teilbranchen erfolgt eine Betrachtung und Diskussion der Anwendung analog zur Abgrenzung und Definition in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

⁹⁸ PtX – Power-to-X: Erzeugung von H₂ oder Derivaten aus erneuerbarem Strom.

Dabei werden unterschiedliche alternative Kraftstoffe, die aus grünem Strom (e-) erzeugt werden, betrachtet:

- Druckwasserstoff (e-CGH₂) mit 35 bis 70 MPa
- Flüssigwasserstoff (e-LH₂)
- Methanol (e-MeOH)
- Ammoniak (e-NH₃)
- Flüssigerdgas (e-LNG)
- Diesel (e-Diesel)

Die folgende Abbildung 14 gibt einen Überblick über die Bereitstellungspfade für alternative Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom bzw. grünem Wasserstoff (H₂).

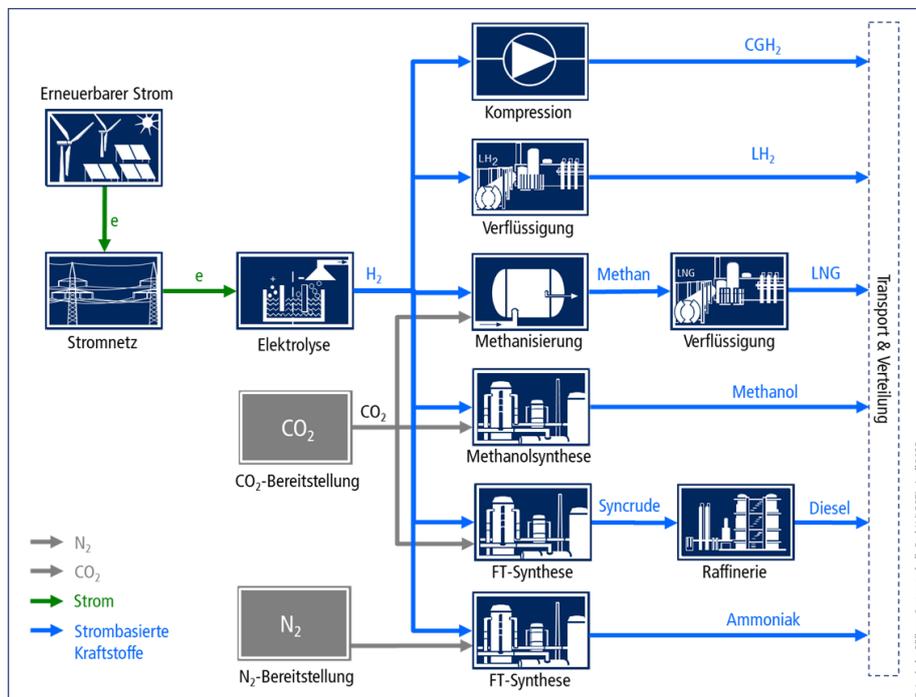


Abbildung 14: Bereitstellungspfade alternativer Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom

2.2.1. Schifffahrt

2.2.1.1. Einordnung Reifegrade / Umsetzbarkeit

Im Bereich der Seeschifffahrt wird in dieser Studie zwischen kürzeren Distanzen (z. B. in Europa, mit möglichem Zwischenbunkern an den Küsten) und Langstrecken-Routen (z. B. nach Asien, mit keinem oder nur eingeschränktem Zwischenbunkern) unterschieden.

Zudem weisen Frachtschiffe (v. a. Container, Tanker und Frachter) unterschiedliche Anforderungen auf als Fahrgastschiffe (v. a. Kreuzfahrtschiffe und Fähren).

Im Folgenden erfolgen eine Einordnung und Diskussion der Reifegrade und Umsetzbarkeit hinsichtlich einer Umstellung auf alternative Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien für Hauptantriebe und Hilfsenergie.

TRL – Technische Reifegrade

Tabelle 21: Seeschifffahrt – Einschätzung Reifegrade für ausgewählte Seeschiffe und H₂-Pfade anhand TRL⁹⁹

	e-CGH ₂	e-LH ₂	e-MeOH	e-NH ₃	e-LNG	e-Diesel
Container (Seeschifffahrt)						
Hauptantrieb (XX MW)	Mittel	Mittel	Hoch	Gering	Hoch	Hoch
Hilfsenergie mit BZ (X–XX MW)	Mittel	Mittel	Mittel	Gering	Mittel	Gering
Kreuzfahrt (Seeschifffahrt)						
Hauptantrieb (XX MW)	Mittel	Mittel	Hoch	Gering	Hoch	Hoch
Hilfsenergie mit BZ (X–XX MW)	Mittel	Mittel	Mittel	Gering	Mittel	Gering
Fähre (Küste)						
Hauptantrieb (XX MW)	Mittel	Mittel	Hoch	Gering	Hoch	Hoch
Hilfsenergie BZ (X–XX MW)	Mittel	Mittel	Mittel	Gering	Mittel	Gering
Gütermotorschiff (Binnenschifffahrt)						
Hauptantrieb (XXX kW)	Hoch	Hoch	Hoch	Gering	Hoch	Hoch
Hilfsenergie mit BZ (XX–XXX kW)	Hoch	Mittel	Hoch	Gering	Mittel	Gering
Flusskreuzfahrt (Binnenschifffahrt)						
Hauptantrieb (XXX kW)	Hoch	Hoch	Hoch	Gering	Hoch	Hoch
Hilfsenergie mit BZ (XX–XXX kW)	Hoch	Mittel	Hoch	Gering	Mittel	Gering

Mit X = kleiner 10, XX = kleiner 100, XXX = kleiner 1.000

⁹⁹ TRL – Technischer Reifegrad, siehe (EC 2017).

Die folgende Tabelle 22 zeigt die TRL-Klassifizierung und die Einstufung der grundsätzlichen Reifegrade in gering, mittel und hoch.

Tabelle 22: Reifegrade anhand der TRL-Klassifizierung¹⁰⁰

TRL	TRL-Beschreibung nach Horizon2020	Reifegrade
1	Grundprinzip verstanden	Gering (1–4)
2	Technisches Konzept beschrieben	
3	Konzept experimentell nachgewiesen	
4	Technologie im Labor validiert	
5	Technologie im industriellen Kontext validiert	Mittel (5–7)
6	Technologie im industriellen Kontext demonstriert	
7	Prototyp im längeren Betrieb demonstriert	
8	Funktionsfähigkeit des Systems nachgewiesen	Hoch (8–9)
9	Funktionsfähigkeit des Systems im längeren Betrieb nachgewiesen	

Sicherheit und Regulatorik

Neben der Einstufung und Betrachtung der technischen Reifegrade für die Energiesysteme ist auch die Berücksichtigung der sicherheitsrelevanten Aspekte bzw. Gefahrenklassen der einzelnen Kraftstoffe von Bedeutung. Dies gilt insbesondere bei der weiteren Diskussion der Umsetzbarkeit und der Herausforderungen für die Genehmigung und Akzeptanz alternativer Kraftstoffe.

Wichtige Themen hinsichtlich des Kraftstoffes sind dabei die Einstufung

- als Gefahrstoff,
- der Toxizität,
- und der wesentlichen Unterschiede zu anderen alternativen Kraftstoffen.

Wie in der folgenden Tabelle gezeigt, weist insbesondere NH₃ die höchsten Gefahrenpotenziale für die Gesundheit und Umwelt auf.

¹⁰⁰ TRL – Technischer Reifegrad, siehe (EC 2017).

Tabelle 23: Sicherheit: CLP-Klassifikation relevanter etablierter sowie alternativer Kraftstoffe (nach Safety Data Sheets der einzelnen Kraftstoffe)

Parameter		Diesel	Benzin	DME	LNG	MeOH	NH ₃	CGH ₂	LH ₂
Physikal. Gefahren	Entflammbares Gas/Flüssigkeit	Kat. 3	Kat. 2	Kat. 1	Kat. 1	Kat. 2	Kat. 2	Kat. 1	Kat. 1
	Gas unter Druck			Verfl.	Gekühl. verfl. Gas		Verfl. Gas	Kompr. Gas	Gekühltes verfl. Gas
Gesundheitliche Gefahren	Akut toxisch	Kat. 4 (Inhal.)				Kat. 3 (oral, dermal, Inhal.)	Kat. 3 (Inhal.)		
	Karzinogenität	Kat. 2							
	Aspirationsgefahr	Kat. 1	Kat. 1						
	Haut Korrosion / Irritation	Kat. 2	Kat. 2					Kat. 1B	
	Spezif. Zielorgan-Toxizität (1-malige Expos.)	Kat. 2	Kat. 3	Kat. 3		Kat. 1 (Augen)	Kat. 1 (Augen)		
Gefahr für die Umwelt	Gefahr für aquat. Umfeld: akute Wirkung						Kat. 1		
	Gefahr für aquat. Umfeld: langfri. Wirkung	Kat. 2	Kat. 2				Kat. 1		

Für alternative Kraftstoffe in der Schifffahrt sind die regulatorischen Entwicklungen einerseits der International Maritime Organization (IMO) über die SOLAS-Bestimmungen, den IGC-Code und den IGF-Code entscheidend. Da die hier festgelegten Vorschriften bei der Handhabung (Lagerung und Verwendung als Kraftstoff) beachtet werden müssen, ist bei Nichtumsetzung in einen Code für einen alternativen Kraftstoff die allgemeine Umsetzbarkeit fraglich bzw. es müssen Einzelgenehmigungen für die Verwendung eingeholt werden.

Für komprimierten gasförmigen Wasserstoff (CGH₂) fehlen momentan Richtlinien zur Lagerung und Verwendung als Kraftstoff. Daher ist die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff auf einem Schiff derzeit nicht zulässig. Für verflüssigten Wasserstoff (LH₂) gibt es derzeit eine vorläufige Richtlinie zur Lagerung für ein Pilotprojekt (Interim Recommendations for Carriage of Liquid Hydrogen in Bulk). Auch die Verwendung als Kraftstoff ist derzeit grundsätzlich nicht zulässig.¹⁰¹ Ammoniak (NH₃) als Ladung an Bord ist bereits Teil des IGC-Codes. Jedoch ist fraglich, ob diese Anforderungen für Fahrgastschiffe ausreichen.¹⁰² In der internationalen Schifffahrt ist Ammoniak als Kraftstoff nach dem IMO International Gas Carrier Code (IGC) verboten.¹⁰³ Methanol (MeOH) wird bereits seit Jahrzehnten über den Schiffsweg transportiert. Für die Verwendung als Kraftstoff fehlt jedoch noch der endgültige Rechtsrahmen. Es gibt jedoch Vorläufige IMO-Leitlinien und eine ISO-Norm ist Entwicklung.¹⁰⁴

¹⁰¹ (DLR 2022).

¹⁰² (DLR 2022).

¹⁰³ (Laval et al. 2020).

¹⁰⁴ (DLR 2022).

2.2.1.2. Technische Perspektiven

Für die erfolgreiche Dekarbonisierung der Schifffahrt und die Umstellung auf erneuerbare Kraftstoffe stellen sich für die See- und Binnenschifffahrt sehr unterschiedliche Rahmenbedingungen.

Seeschifffahrt

Grundsätzlich lassen sich die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Seeschifffahrt wie folgt zusammenfassen:

- Die Seeschifffahrt, insbesondere bei langen Fahrtrouten, weist sehr hohe Anforderungen an die Energiespeicherung und Systemleistungsdichte für die Energieversorgung auf.
- Internationale Entwicklungen (Kraftstoffpreise/-verfügbarkeit) sind wichtig bei der Wahl der Kraftstoffe, insbesondere für die Betreiber von internationalen Routen.
- Innerhalb des maritimen Sektors hat die Seeschifffahrt mit Abstand die langfristige Perspektive bzw. Entwicklungshorizont hinsichtlich einer Einführung und Umstellung auf erneuerbare Kraftstoffe.

Aus den bisherigen Analysen und Gesprächen mit den Akteuren konnten folgende Kernaussagen und Einschätzungen für die technische Perspektive von grünem Wasserstoff / Derivaten für die Seeschifffahrt abgeleitet werden:

- „Die Hochseeschifffahrt hat Anspruch auf ‚eigene / unabhängige‘ Kraftstoffversorgung“
- „Kein Teilnehmer am regulären Energiemarkt“
- „Eigene Bunkerinfrastrukturen und Beschaffungsstrategie“
- „Weltweite Kraftstoffpreise & verfügbare Infrastrukturen entscheiden Wahl des Kraftstoffes bzw. der Antriebe der Reedereien“
- „Regulatorische Vorgaben geben entscheidende Rahmenbedingungen (Mehrkosten werden auf Kunden umgelegt)“
- „Verbrennungsmotor wird bleiben für lange Fahrtrouten“
- „Derivate werden sich durchsetzen“
- „H₂ weist unzureichende Energiedichte auf“ (Anforderungen an Bunkerzyklen)
- „Biofuels werden langfristig keine Relevanz spielen“
- „Internationale Entwicklungen beeinflussen Wahl der Derivate / Bunkerinfrastrukturen“

In der Seeschifffahrt wird der Einsatz von Verbrennungsmotoren und Derivaten favorisiert, insbesondere bei Frachtschiffen mit langen Routen, auch um möglichst wenig zusätzliche Bunkerorte (über die aktuellen hinaus) zu benötigen. Über den sogenannten „Dual-Fuel-Motoren-Ansatz“ wird aktuell insbesondere für die „Übergangsphase“ sichergestellt, dass neben einem neuen, alternativen Kraftstoff auch mit herkömmlichem Kraftstoff die Versorgung und der Betrieb aufrechterhalten werden können. Dies ist grundsätzlich mit mehr Aufwand und höheren Kosten verbunden, reduziert jedoch die Risiken, die mit einer technischen Umstellung, der (weltweiten) Verfügbarkeit des neuen Kraftstoffes und der entsprechenden Kostenentwicklung der Kraftstoffe verbunden sind.

Für große Frachtschiffe mit langen Fahrtrouten, wie z. B. Containerschiffe, und geschultem Personal werden insbesondere folgende erneuerbare Kraftstoffe favorisiert:

- Methanol (MeOH),
- Flüssigwasserstoff (LH₂) und auch
- Ammoniak (NH₃).

Für Kreuzfahrtschiffe, mit vielen Fahrgästen und touristischen Fahrtrouten, wie auch durch den steigenden öffentlichen Druck zur Nachhaltigkeit der Kreuzfahrt haben sicherheitsrelevante und genehmigungsrechtliche Aspekte eine hohe Bedeutung bei der Wahl der erneuerbaren Kraftstoffe. Hier ist beispielsweise die Nutzung von NH₃ aufgrund der Gefährdungskategorie praktisch ausgeschlossen. Auch die Nutzung von MeOH weist gegenüber herkömmlichem Kraftstoff ein erhöhtes Gefährdungspotenzial für Menschen auf. Für Fahrtrouten entlang der Küsten, z. B. in (Nord-)Europa, könnten bei der Nutzung von Druckwasserstoff (CGH₂) Synergien mit beispielsweise dem Straßenverkehr genutzt bzw. erschlossen werden¹⁰⁵. Für Fahrgastschiffe bietet der Einsatz der Brennstoffzelle eine attraktive Perspektive, da Brennstoffzellen:

aufgrund der Modularität und Skalierbarkeit einen Vorteil bei der Integration auf Schiffen bieten, es können dadurch Redundanzen ermöglicht werden; statt zwei Systemen (Haupt- und Hilfssystem) kann ein System bestehend aus Einzelmodulen auf dem Schiff eingesetzt werden.

- Synergien mit Verkehrssektor (Nfz, Pkw) und stationäre Systeme (BHKW)
- Nullemission (CO₂, Luftschadstoffe)
- Reduktion Lärmemissionen aufgrund des Elektroantriebs
- Trigeneration (KWKK) zur Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung (insbesondere für die steigende Hotellast auf Kreuzfahrtschiffen von Vorteil)

Folgende Kraftstoffe werden für die Kreuzfahrt favorisiert:

- Methanol (MeOH)
- Flüssigwasserstoff (LH₂)
- Druckwasserstoff (CGH₂)

Beispiel: Perspektive Brennstoffzelle für Kreuzfahrtschiffe

Das Demoprojekt Pa-X-ell untersuchte unter anderem, wie der Heterogenität an Bord eines Kreuzfahrtschiffes begegnet werden kann und eine Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) die Gesamtenergieeffizienz steigern kann. Der gewählte Lösungsansatz ist ein modulares Konzept, in dem Brennstoffzellen als Teil der Trigeneration, zusammen mit Batterien und (grünem) Verbrennungsmotor, eine zentrale Rolle spielen. Für die Bereitstellung der Hilfsenergie hat das Schiff verschiedene Energiemodule mit 100–1.000 kW (Abbildung 15). Durch diese Dezentralität werden eine hohe Redundanz, hohe Effizienz

¹⁰⁵ Beispiel: Aufbau einer H₂-Betankungsinfrastruktur in Europa. Siehe AFIR – Europäische Richtlinie zum Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe - <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0559>, zuletzt abgerufen am 16.5.2023.

und somit niedrige Emissionen erreicht. Für den Einsatz dezentraler Brennstoffzellen auf Kreuzfahrtschiffen spricht zudem die Möglichkeit, die hohe Schwankung der Gesamtleistung (abhängig von Jahreszeit und Gesamtbedarf) ausgleichen zu können. Beispielsweise lassen modulare Brennstoffzellen damit auch eine konstantere Leistungsauslegung der Landstromversorgung zu.

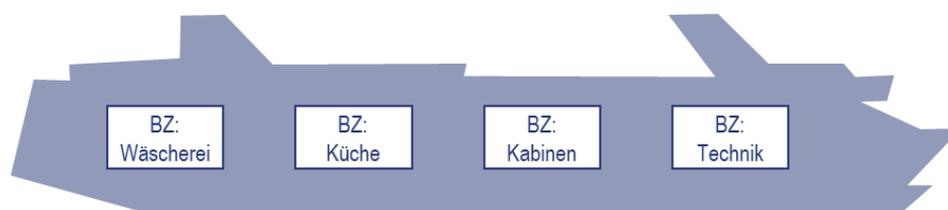


Abbildung 15: Schematische Darstellung Brennstoffzellen (BZ) für unterschiedliche Hilfssysteme im Kreuzfahrtschiff¹⁰⁶

Binnenschifffahrt

Für die Einführung von Brennstoffzellen in der Binnenschifffahrt eröffnen sich aufgrund der Leistungsanforderungen Synergiepotenziale mit der Entwicklung und Markteinführung von Brennstoffzellen für stationäre BHKW sowie Lkw, Busse und Züge. So ist beispielsweise eine breite Markteinführung auf Basis einer neuen Brennstoffzellentechnologie-Plattform für Nutzfahrzeuge ab 2026 geplant. Brennstoffzellen bieten eine skalierbare Option für Nullemissionsantriebe für kommerzielle Personen- und Frachtbinnenschifffahrt mit verschiedenen Alternativkraftstoffen.

Aufgrund der langen Nutzungszyklen bei den Binnenschiffen ist jedoch auch eine frühe Einführung von langfristig robusten Kraftstoff- und Antriebsoptionen (andernfalls Strukturbruchrisiko) erforderlich.

Neben MeOH wird hier auch Wasserstoff als Option betrachtet: Wasserstoff eröffnet Synergien beim Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur (insbesondere CGH₂) für Binnenschiffe. Jedoch erfordert die geringe H₂-Speicherdichte (volumetrisch) eine angepasste Bunkerlogistik und -strategie. Für eine optimierte Integration von CGH₂-Tanks in Binnenschiffen ist meist ein Neubau als „Future-Fuel-Ready“ (innovative Konzepte) präferiert gegenüber einem Retrofit. Auch für MeOH stellen der Aufbau der Infrastruktur und die Genehmigung eine Herausforderung dar. Grundsätzlich ist die Binnenschifffahrtsbranche sehr sensibel bezüglich Wirtschaftlichkeit, steht aber unter zunehmendem (öffentlichem und regulatorischem) Druck zur kurzfristigen Umsetzung und Einhaltung der Klima- und Schadstoffziele.

¹⁰⁶ LBST nach (NOW 2013).

2.2.2. Häfen

2.2.2.1. Einordnung Reifegrade / Umsetzbarkeit

Die hohe Anzahl an Demonstrations- und Umsetzungsprojekten spiegelt sich auch in der Verfügbarkeit und dem Reifegrad der Technologien wider. So sind z. B. erste Modelle von Gabelstaplern, AGVs, Zugmaschinen mit Brennstoffzellenantrieb bereits kommerziell verfügbar, für einige weitere Anwendungen gibt es Prototypen in der Erprobung. Ein Gesamtüberblick ist in Tabelle 24 verfügbar.

Tabelle 24: Einordnung Reifegrade¹⁰⁷ von Hafen- und Rangierfahrzeugen¹⁰⁸

Hafenfahrzeug/ Rangierfahrzeug	Wasserstoff		Ammoniak / Methanol	
	Verbrenner	Brennstoffzelle	Verbrenner	Brennstoffzelle
AGV	Gering	Hoch	Gering	Gering
Stapler	Gering	Hoch	Gering - Ammoniak	Hoch - Methanol
Hafenmobilkran	Gering	Gering	Gering	Gering
Leercontainerstapler	Gering	Mittel	Gering - Ammoniak	Gering
Reachstacker	Gering	Mittel	Gering - Ammoniak	Gering
Straddle Carrier	Mittel	Mittel	Gering	Gering
Zugmaschinen	Mittel	Hoch	Gering	Gering
Rangierlokomotive	Mittel	Hoch	Gering	Gering

2.2.2.2. Technische Perspektiven

Bei den Häfen wird die Implementierung von Wasserstofftechnologien bzw. -anwendungen im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängen:

- dem technisch und wirtschaftlich erreichbaren Grad der Elektrifizierung z. B. durch den Einsatz von batterieelektrischen und/oder kabelgebundenen Hafenumschlaggeräten,
- der tatsächlichen Verfügbarkeit von günstigem Wasserstoff, der einen wirtschaftlichen Betrieb der Wasserstoffanwendungen möglich macht.

Die Verfügbarkeit der Technologie mit Brennstoffzellenantrieben verbessert sich zunehmend und mit einer hohen Dynamik, sodass AGVs, Gabelstapler, Zugmaschinen und Rangierlokomotiven bereits (in ersten Modellen) kommerziell verfügbar sind und Leercontainerstapler, Reachstacker und Straddle Carrier als Prototypen in Demonstrationsprojekten zum Einsatz kommen, um ihre Alltagstauglichkeit unter Beweis zu stellen.

¹⁰⁷ TRL – Technischer Reifegrad, siehe (EC 2017).

¹⁰⁸ (Ramboll 2022) und <https://www.golem.de/news/diesel-ersatz-rangierloks-auf-wasserstoff-2212-170165.html>, zuletzt abgerufen am 17.05.2023, sowie <https://pesa.pl/en/railway-premiere-of-the-year-pesa-presented-the-hydrogen-locomotive-at-trako/>, zuletzt abgerufen am 17.05.2023.

Nun geht es darum, für die unterschiedlichen Technologien Stückzahlen zu generieren, um über Skaleneffekte die erforderliche Kostendegression zu realisieren. Dabei unterstützen auch die verschiedenen europäischen, nationalen und regionalen Fördermöglichkeiten.

2.2.3. Schiffbau und Zulieferer

2.2.3.1. Einordnung Reifegrade / Umsetzbarkeit

Schiffbaubetriebe haben keine technischen oder energetischen Prozesse, welche die Anwendung von Wasserstoff und Derivaten unmittelbar erfordern. Schiffbaubetriebe sind daher als Industriebetriebe zu betrachten, die die allgemeinen politischen Dekarbonisierungsziele erreichen müssen. Für solche Betriebe gilt allgemein die Anwendungsmöglichkeit im Bereich Gebäudewärme und Logistik (Abbildung 16).

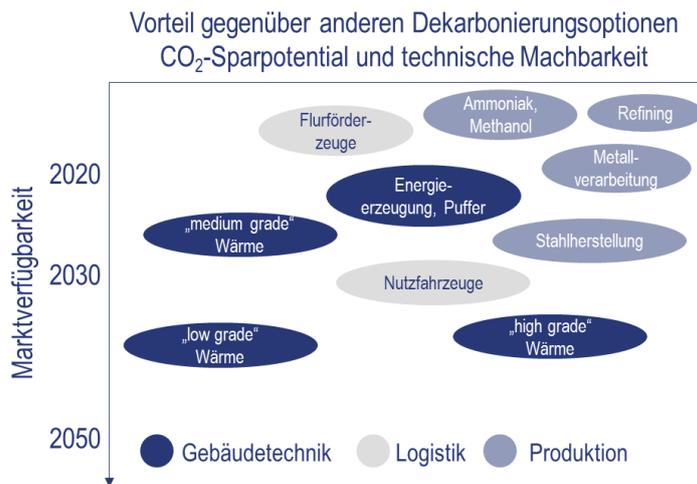


Abbildung 16: Darstellung möglicher H₂-Anwendungen in „Fabriksystemen“¹⁰⁹

Das Energiemanagement wendet dabei beispielsweise das TOP-Prinzip¹¹⁰ an, wobei ein Fokus aktuell auf den personenbezogenen Maßnahmen liegt. Technische Maßnahmen wie der Einsatz von lokal produzierter „low-grade“-Wärme in Kombination mit Elektrizität im Blockheizkraftwerk bieten Potenziale für Werften mit ihrer Kombination von strombasierten Schweißprozessen und dem Wärmebedarf in großen Hallen und wurden durch die Werften bereits geprüft. Aufgrund der hohen Investitionskosten beispielsweise in Wärmeverteilungssysteme und Unsicherheiten über zukünftige Energieträgerpreise werden solche Maßnahmen jedoch aktuell nicht umgesetzt.

Für Werften ist bei einigen wenigen Spezialanwendungen die Anwendung von Wasserstoff als Prozessgas erforderlich. In der folgenden Tabelle 25 sind mögliche Anwendungen im Werftkontext gelistet und der jeweilige ungefähre Reifegrad eingeordnet.

¹⁰⁹ LBST nach (Imdahl 2021).

¹¹⁰ <https://arbeitsschutz-wiki.de/index.php/TOP-Prinzip>, zuletzt abgerufen am 12.05.2023.

Tabelle 25: Mögliche Wasserstoffanwendungen im Schiffbau und ihr technischer Reifegrad (TRL)¹¹¹

	H ₂ -Anwendung	Kommentar	Reifegrad
Werften	BHKW (Gasturbine)	z. B. 2G, sinnvoll bei (großen) Schiffbaubetrieben, da Kombination Wärme/Elektrizität möglich	Mittel
	BHKW (Brennstoffzelle)	Verschiedene Produkte für (Mikro=Heim-)Anwendung auf dem Markt, z. B. Viessmann, Bosch etc.	Mittel
	Flurförderzeug	Insbesondere in den USA bereits vielfach in Anwendung	Hoch
	Dunkelstrahler	Hallenheizung (z. B. Anbieter Schwank)	Mittel
Spezialanwendungen (H ₂ als Prozessgas)	Hydridspeicheraktivierung	Technologie ausgereift, aber keine Verbreitung über Rüstungsanwendungen hinaus aufgrund von Kosten erwartbar	Hoch
	H ₂ -Testanlagen	technisch keine Weiterentwicklung nötig	Hoch

Beispielhafte Betrachtung Gießereien als typischer Prozess bei maritimen Zulieferern:

WICHTIG

Im Rahmen dieser Studie wurde keine spezifische Analyse der technischen Entwicklung von Wasserstoff in Stahlbranche und metallverarbeitenden Betrieben sowie Maschinenbau vorgenommen. Nur Gießereiprozesse werden beispielhaft genauer beleuchtet (da relativ typisch für die maritime Branche, z. B. zur Herstellung von Großmotorenblöcken und Schiffspropellern).

Forschungsprojekte betrachten die Anwendung von Wasserstoff in Gießereiprozessen und sehen grundsätzliche technische Machbarkeit über fast alle Prozesse hinweg (siehe Tabelle 26). Linde, als großer Technologieanbieter, hat in Kooperation mit Ovako (Schweden) bereits für seine OXYGON- (Pfannenvorwärmung) und REBOX-Produkte (Wiedererwärmungsprozess) „H₂-readiness“ bewiesen¹¹². Außerdem hat beispielsweise der Aluminiumgießer G.A. Röders aus Soltau mit Partnern das Projekt¹¹³

¹¹¹ TRL – Technischer Reifegrad, siehe (EC 2017).

¹¹² (IRONANDSTEEL 2020).

¹¹³ <https://www.giesserei-praxis.de/news-artikel/artikel/ziel-klimafreundlicher-giessereibetrieb-mit-wasserstoff>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

„Optiprogress“ gestartet, um Wasserstoffschmelzöfen zu entwickeln, geht aber von einer Entwicklungszeit von „einigen Jahren“ aus.

Gleichzeitig ist einschränkend zu erwähnen, dass die Deutsche Energieagentur (dena) im Zusammenhang mit Dekarbonisierungsstrategien für die Gießerei-Industrie¹¹⁴ kein besonderes Augenmerk auf Wasserstofflösungen gelegt hat.

Tabelle 26: Technische Machbarkeit (NICHT Reifegrad) für Wasserstoffanwendung in Teilprozessen der Gießereien nach Innoguss¹¹⁵

Prozess	Technische Machbarkeit
Schmelzaggregat	F&E-Bedarf
Pfannenheizung	Hoch*
Wärmebehandlung	Hoch*
Heizprozesse	Hoch*

*aber auch weiterer F&E-Bedarf

2.2.3.2. Technische Perspektiven

Schiffbau

Der Schiffbau als Teilbranche unterliegt wie alle Industriezweige in Deutschland den allgemeinen CO₂-Minderungszielen. Da sich jedoch unmittelbar keine der angewendeten Prozesse für eine Anwendung von Wasserstoff anbieten, hängt dessen Einführung wesentlich von der systemischen Entwicklung und damit allgemeiner Verfügbarkeit ab und nicht von technischen Weiterentwicklungen¹¹⁶. Bis dahin präferieren, wo möglich (z. B. Flurförderzeuge), die Betriebe tendenziell eine Elektrifizierung. Damit ergibt sich kurz- bis mittelfristig nur der H₂-Bedarf für die beschriebenen Spezialanwendungen sowie Test- und Demonstrationsanlagen.

Zulieferer

Die Zulieferer insbesondere im Bereich der Metallerzeugung und Erstverarbeitung zeigen eine geringere Tendenz zur Elektrifizierung und insbesondere die Stahlindustrie gilt als „hard-to-abate“-Sektor. Da die maritime Branche hier jedoch nur vergleichsweise geringe Nachfrageeffekte erzeugt, ist nicht davon auszugehen, dass beispielsweise eine Forderung nach grünem Schiffsstahl die Einführung von Wasserstoffanwendungen bei den Zulieferern deutlich beschleunigen wird. Somit ist auch hier die technische Weiterentwicklung unabhängig von der maritimen Branche und im größeren Gesamtkontext zu diskutieren. Als Näherung für Wasserstoffanwendungen kann jedoch technisch mittel- bis langfristig ein vollständiger Ersatz von heutigen Erdgasanwendungen angenommen werden (siehe Beispiel Gießereien).

¹¹⁴ (dena 2021).

¹¹⁵ <https://www.guss.de/innoguss/wege-zur-dekarbonisierung>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

¹¹⁶ Technische Weiterentwicklungen im Bereich der Wasserstoffherzeugung und -bereitstellung und damit Auswirkungen auf Preise und Verfügbarkeit sind nicht Teil der vorliegenden Arbeit.

2.2.4. Meerestechnik

2.2.4.1. Einordnung Reifegrade / Umsetzbarkeit

Wie in der folgenden Tabelle 27 gezeigt, lassen sich die möglichen H₂-Anwendungen grob in die Kategorien Antriebe, dezentrale Energieversorgung und Offshore-Anwendungen einteilen.

Tabelle 27: Mögliche Wasserstoffanwendungen in der Meerestechnik und ihr technischer Reifegrad¹¹⁷

	Anwendung	Kommentar	Reifegrad
Antriebe	< 5 kW	Vielfach in bereits langjähriger Anwendung (z. B. MARUM SEAL)	Hoch
	80 kW	Leistungsdichte kommerziell auch von militärischen U-Booten und Nutzfahrzeuganwendungen	Mittel
	Schiffsantriebe		Siehe Schiffe
Dezentrale Energieversorgung	Notstromaggregate	Energiebereitstellung	Hoch
	Hindernisbefuerung	EFOY, kommerzielles Produkt	Hoch
Ölplattformen	Rückverstromung	Konzeptuell	Niedrig
	H2Mare (PtX-Wind)	Direktumwandlung von Wasserstoff in Derivate auf Offshore-Plattform	Sehr niedrig

2.2.4.2. Technische Perspektiven

Die Meerestechnik als forschungsintensive Teilbranche ist keinem unmittelbaren politischen Druck ausgesetzt. Viele Kleinanwendungen können bereits jetzt umgesetzt werden, meist basierend auf eher explorativen als wirtschaftlichen Entscheidungsgrundlagen. Mögliche weitere neue (Kleinst-)Anwendungen werden keine signifikanten Nachfragemengen erzeugen. Eine Ausnahme bildet die Entwicklung von PtX-Anlagen auf See. Zwar wäre hier der Verbrauch von Wasserstoff in größeren Mengen möglich, doch ist angesichts der technischen Herausforderungen (korrosive Meeresluft, Platzeinschränkungen etc.) eine Umsetzung kurz- bis mittelfristig nicht zu erwarten. Zusätzlich würde eine Erzeugung von beispielsweise Schiffstreibstoffen den Endbedarf eher in andere Teilbranchen der maritimen Wirtschaft verschieben.

¹¹⁷ TRL – Technischer Reifegrad, siehe (EC 2017).

3. METHODIK ZUR MENGENABSCHÄTZUNG

3.1. Zusammenfassung

Im Kapitel 3 werden teilbranchenspezifische Annahmen zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2045 entwickelt und begründet. Im Wesentlichen wird hierfür zwischen einer präferierten Elektrifizierung und einer präferierten Anwendung von Wasserstofflösungen unterschieden. Abhängig von der verfügbaren Datenbasis können dazu verschiedene Ansätze und Vorgehensweisen gewählt werden, z. B. eine Hochrechnung („Bottom-Up“), ein Top-Down- oder auch Misch-Ansatz:

- Der Wasserstoffbedarf in der **Schifffahrt** wird in dieser Studie detailliert über technische Annahmen für verschiedene Schiffstypen hochgerechnet (Bottom-Up).
- Für **Häfen** werden die H₂-Bedarfe für Hafenumschlaggeräte ebenfalls über technische Annahmen typspezifisch bestimmt, während die Stromversorgung und die Gebäudewärme über einen repräsentativen Hafen ermittelt wird (Misch-Ansatz).
- Der Bedarf bei **Schiffbau** und **Zulieferer** lässt sich über ihre gesamtwirtschaftlichen Anteile und Energieverbräuche abschätzen (Top-Down).
- Aufgrund der geringen und sehr spezifischen Mengen bzw. Bedarfe einzelner (Spezial-)Anwendungen erfolgte für die **Meerestechnik** keine vertiefende Bilanzierung eines Gesamtbedarfs.

3.2. Beschreibung Szenarien, methodischer Ansatz (Annahmen) und Datenbasis

In Deutschland ist das politische Ziel der Klimaneutralität bis 2045 gesetzlich im Bundesklimaschutzgesetz¹¹⁸ verankert. Hierbei werden sektorspezifische Teilziele vorgegeben, die bereits 2030 einzuhalten sind. Diese Teilziele sind sowohl für den Transportsektor als auch den Industriesektor definiert und betreffen damit alle wesentlichen Teile der maritimen Branche.

Es ist in Deutschland unstrittig, dass zur Erreichung dieser Ziele im Transportsektor insbesondere ein Antriebswechsel nötig ist und im Bereich der Industrie sowohl insbesondere Strom- und Wärmeerzeugung CO₂-neutral realisiert werden müssen und können. Unsere Analysen in den Kapiteln 1 und 2 haben gezeigt, dass im Großen und Ganzen in der maritimen Branche die meisten energieverbrauchenden Prozesse durch Wasserstoff- und/oder Derivat Anwendung¹¹⁹ umsetzbar sind. Somit lassen sich aufseiten der (maritimen) Verbraucher keine wesentlichen technischen Herausforderungen mehr identifizieren, die einer langfristigen Dekarbonisierung durch Wasserstofflösungen entgegenstehen. Große Unsicherheit (nicht nur in der maritimen Branche¹²⁰) besteht in vielen Fällen jedoch im Anteil der oftmals ebenfalls technisch möglichen Umsetzung von batterieelektrischen Lösungen. Zusätzlich ist der Einsatz der jeweiligen Technologien und damit der Wasserstoffgesamtbedarf von einem komplexen Umfeld weiterer Faktoren abhängig, die wir einordnend im Kapitel 4 diskutieren werden. Dazu gehören:

- Politische Verpflichtungen / Rahmenbedingungen bzw. Investitionssicherheit / Technologieentscheidungen

¹¹⁸ <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BjNR251310019.html>, zuletzt abgerufen am 03.07.2023.

¹¹⁹ Diese Studie geht konsequent von der Anwendung von grünem und damit CO₂-neutralem Wasserstoff aus.

¹²⁰ (Ragwitz 2023).

- Synergiepotenzial
(u. a. Markteinführung / Herstellung Technologie / H₂/Derivate sowie Logistik H₂/Derivate)
- Infrastrukturabhängigkeit (lokale Verfügbarkeit)
- Gesamtverfügbarkeit von erneuerbaren Energien und erneuerbarem H₂ (bzw. Derivaten)
- Kosten

Um diese Komplexität widerzuspiegeln, werden in dieser Studie zur Hochrechnung zwei (Grenz-)Szenarien angewendet (Abbildung 17). Über differenzierte, begründete Annahmen wird sich dem möglichen zukünftigen Wasserstoffbedarf in den jeweiligen Szenarien genähert.



Abbildung 17: Schematische Darstellung der Szenarien zum Wasserstoffanteil am Energiebedarf zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2045

Die Annahmen zur konkreten Ausprägung der jeweiligen Anteile werden in den folgenden Teilkapiteln (siehe unten) je Teilbranche dargestellt und begründet. Beispielsweise wird die Elektrifizierung in der Hochseeschifffahrt nur eine untergeordnete Rolle spielen, wohingegen beispielsweise viele Hafenumschlaggeräte sowohl batterieelektrisch oder Brennstoffzellen-elektrisch angetrieben werden könnten.

Die betrachteten Zeiträume sind in Abbildung 18 dargestellt. Eine Einteilung in kurzfristige, mittelfristige und langfristige Bedarfe erscheint zweckdienlich angesichts der großen Heterogenität der maritimen Branche. Überschneidungen der Zeiträume sind bewusst zugelassen:

- Kurzfristig: Stand der Technik sowie Marktdurchdringung bis ca. 2025
- Mittelfristig: Entwicklung bis in den Anfang der 30er-Jahre (bis ca. 2035)
- Langfristig: bis zu Klimaneutralität 2045 und darüber hinaus (nach ca. 2033)

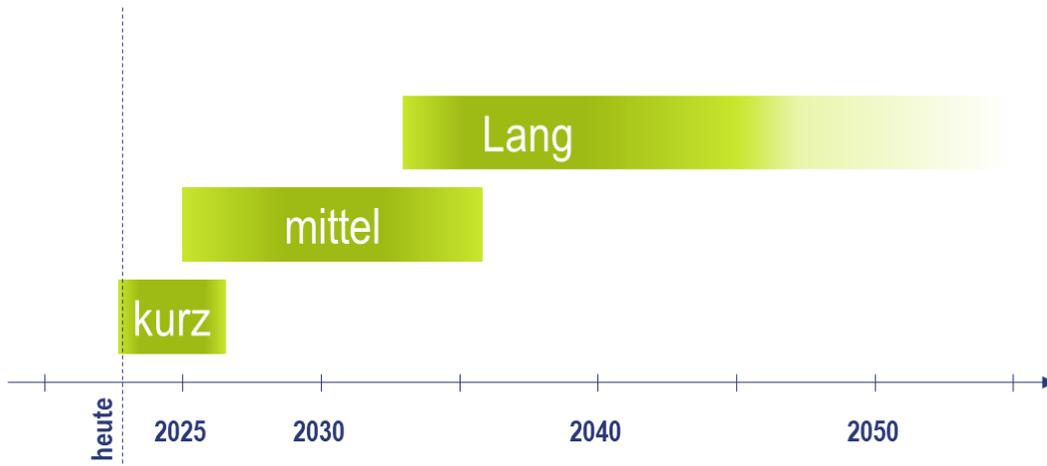


Abbildung 18: Definition der betrachteten Zeiträume in dieser Studie.

Die vorliegende Studie ist auf öffentlich verfügbare Datensätze angewiesen. Um trotzdem eine möglichst robuste Abschätzung der Wasserstoffbedarfe liefern zu können, werden unterschiedliche Ansätze je Teilbranche diskutiert und angewendet (Abbildung 19).



Abbildung 19: Ansätze zur Entwicklung robuster Bedarfsabschätzung unter Berücksichtigung der verfügbaren Datenbasis und -qualität

Wo möglich wurde ein Bottom-Up-Ansatz gewählt, der die höchste zeitliche und technische Differenzierung ermöglicht, jedoch eine detaillierte Datengrundlage erfordert. Alternativ kann auf Basis von statistischen Datensätzen und Analysen mithilfe von eines Top-Down-Ansatzes eine robuste Ableitung für einzelne Teilbranchen erfolgen. Falls innerhalb einer Teilbranche die Datenbasis für bestimmte Energieverbraucher besser war als für andere, wurde ein Mischansatz gewählt.

3.2.1. Schifffahrt

Für die Schifffahrt wurden zwei unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung des Wasserstoffbedarfs betrachtet. Diese unterscheiden sich sowohl in der Datenbasis als auch im Umfang der Ergebnisse.

Der erste Ansatz (Top-Down) legt die Daten des German National Inventory Report (NIR)¹²¹ zugrunde, der die jährlichen Treibhausgasemissionen für die Klimarahmenkonvention (UNFCCC) bilanziert. Erfasst werden die Kraftstofflieferungen für den gesamten



¹²¹ https://iir.umweltbundesamt.de/2023/sector/energy/fuel_combustion/transport/navigation/start, zuletzt abgerufen am 07.07.2023.

Schiffssektor in Deutschland, also Binnenschifffahrt, nationale Seeschifffahrt, internationale Seeschifffahrt, Fischerei und Marine. Fischerei und Marine werden jedoch für die Berechnung des Wasserstoffbedarfs nicht miteinbezogen. Als Basisjahr für die Berechnung des Wasserstoffbedarfs werden die Kraftstofflieferungen aus 2021 gewählt. Es ist jedoch zu betonen, dass diese Zahlen einer sehr großen jährlichen Schwankung von über 100 % unterliegen können. Außerdem erlaubt dieser Ansatz nur beschränkt eine technische und zeitliche Differenzierung. Zum Beispiel kann keine Verbesserung des Wirkungsgrads angenommen werden und die bisherigen Kraftstofflieferungen werden „schlicht“ entsprechend den in Tabelle 29 beschriebenen Szenarien durch H₂ bzw. H₂-Derivate ersetzt. Das heißt, insbesondere die mittelfristige Entwicklung kann hier nur über einen geschätzten Anteil des angestrebten Gesamtbedarfs durch grobe Schätzung vorgenommen werden.

Im zweiten Ansatz (Bottom-Up) für die Hochrechnung des H₂-Bedarfs werden die Schiffe aus der zentralen Binnenschifffahrtsbestandsdatei¹²² und aus der Statistik der deutschen Handelsflotte¹²³ berücksichtigt. Der H₂-Bedarf wird für verschiedene Schiffstypen über die jeweilige Anzahl, durchschnittliche Leistung [kW], durchschnittliche Last [%], Fahrzeit [h/a] und den Wirkungsgrad des Motortyps [%] ermittelt. Die jeweiligen Annahmen für die berücksichtigten Schiffstypen sind in Tabelle 28 aufgeführt und werden im Weiteren begründet.



Tabelle 28: Schifffahrt: Annahmen Bottom-Up

	Typ	Anzahl	Durchschnittliche Leistung [kW]	Durchschnittliche Last [%]	Durchschnittliche Flottenfahrzeit [h/a]	Wirkungsgrad Antrieb [%]
Seeschifffahrt	Frachtschiffe	1.412	17.700	70	2.076	35
	Tankschiffe	191	9.200	70	2.200	35
	Fahrgastschiffe	82	12.500	70	3.100	50
	Kreuzfahrtschiffe	17	43.000	50	3.100	35
Binnenschifffahrt	Frachtschiffe	2.382	380	70	2.000	50
	Bunkerboote	64	195	70	2.000	50
	Schub- und Schleppboote	433	327	51	2.000	50
	Personenbarkassen	169	110	22,5	2.000	50
	Fähren/ Fahrgastschiffe	1.265	284	66	2.000	50

Die durchschnittliche Leistung in der Seeschifffahrt richtet sich nach der Kraftstoffanalyse in der Schifffahrt nach Segmenten¹²⁴ (siehe auch Tabelle 3Tabelle 3). Es wurde der gewichtete Durchschnitt je Schiffstyp gebildet. Fahrgastschiffe und Kreuzfahrtschiffe werden aufgrund der großen

¹²² (WSV 2022).

¹²³ (BSH 2023).

¹²⁴ (Ramboll 2022b).

Leistungsunterschiede getrennt betrachtet. In der Binnenschifffahrt wurde die durchschnittliche Leistung aus den in der zentralen Binnenschifffahrtsdatei¹²⁵ aufgeführten Leistungswerten gebildet (siehe auch Tabelle 4). Die durchschnittliche Last in der Binnenschifffahrt richtet sich nach der Studie „Strombasierte Kraftstoffe für Brennstoffzellen in der Binnenschifffahrt“¹²⁶. Da für die Seeschifffahrt keine Daten zur durchschnittlichen Last vorlagen, wird ein Wert von etwa 70 % angesetzt, der etwa dem Verhältnis der erreichbaren Höchstgeschwindigkeiten zu effektiv gefahrener Geschwindigkeit entspricht. Für Fahrgastschiffe wird dieser Wert ebenfalls gewählt. Bei Kreuzfahrtschiffen wird davon ausgegangen, dass diese häufiger im Teillastbereich gefahren werden.

Die durchschnittliche jährliche Fahrzeit lässt sich zwei Quellen entnehmen: der Kraftstoffanalyse in der Schifffahrt nach Segmenten¹²⁷ und aus der EU-MRV-Regulation 2015/757¹²⁸. Gewählt wurden die Daten aus EU-MRV. Die hier errechenbare durchschnittliche jährliche Fahrzeit bezieht sich auf die ganze Flotte, stellt für die Gesamtbetrachtung also einen aussagekräftigeren Wert dar. Es ist jedoch wichtig, zu betonen, dass individuelle Schiffe wesentlich höhere Betriebszeiten haben können. So ist durchaus realistisch, dass ein Frachtschiff rund 5.000 h/a auf See verbringt. Für Binnenschiffe wird pauschal eine durchschnittliche jährliche Fahrzeit von ca. 2.000 h/a angenommen¹²⁹. Für den Wirkungsgrad des Antriebssystems wird für Schiffstypen, bei denen Verbrennungsmotoren dominieren werden (also zukünftig H₂-Derivate eingesetzt werden), 35 % angenommen, bei Schiffstypen, bei denen Brennstoffzellen dominieren werden, 50 %.

Die deutsche Handelsflotte agiert international und bunkert nicht ausschließlich in Deutschland. Daher wird in dieser Methode nicht die (H₂-)Nachfrage in Deutschland ermittelt (die auch durch internationale Reeder entsteht), sondern die durch deutsche Reeder entstehende internationale Nachfrage.

Tabelle 29: Schifffahrt: Annahmen je Szenario

	Szenario Präferenz Elektrifizierung	Szenario Präferenz Wasserstoff
Kurzfristig	<ul style="list-style-type: none"> • Ausgewählte Demonstrationsprojekte (siehe Tabelle 8 und Tabelle 9) 	
Mittelfristig	<ul style="list-style-type: none"> • 5–6 % Kraftstoff CO₂-neutral, aber Großteil Biokraftstoffe • Bordstromversorgung Batterie • Landstromversorgung über Netzanschluss 	<ul style="list-style-type: none"> • 5–6 % Kraftstoff CO₂-neutral, Großteil Derivate • 30 % Kreuzfahrer + (Binnen-/See-) Fahrgastschiffe H₂/Derivate
Langfristig	<ul style="list-style-type: none"> • Binnen- und Küstenschifffahrt batteriedominiert • Kreuzfahrer starke Hybridisierung • Landstromversorgung über Netzanschluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Alle Kreuzfahrer + Fähren H₂/Derivate • Binnen- und Küstenschifffahrt auf H₂-BZ • Landstromversorgung BZ
	<ul style="list-style-type: none"> • Hochseeschiffe fahren mit Derivaten 	

In Abbildung 20 ist der H₂-Bedarf basierend auf den Daten des German National Inventory Report (NIR) in den beiden Szenarien dargestellt. Bis zu 19 TWh_{H₂}/a bzw. 570.000 t_{H₂}/a können demnach in Deutschland

¹²⁵ (WSV 2022).

¹²⁶ (LBST 2020).

¹²⁷ (Ramboll 2022b).

¹²⁸ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32015R0757>

¹²⁹ Arbeitsstunden 8760 / 2 * (ca. 250 Arbeitstage/365 Tage pro Jahr) – Liegezeit ~ 2000 h/a.

verbraucht werden, hauptsächlich durch die internationale Schifffahrt. Wie bereits geschildert, unterliegen diese Zahlen jedoch großen Unsicherheiten aufgrund der jährlichen Schwankungen im Reporting. Sie stellen also lediglich einen Anhaltspunkt dar, welche Mengen in Deutschland bebunkert werden könnten, und sind als Vergleichswert zu der Bottom-Up-Methode zu sehen.

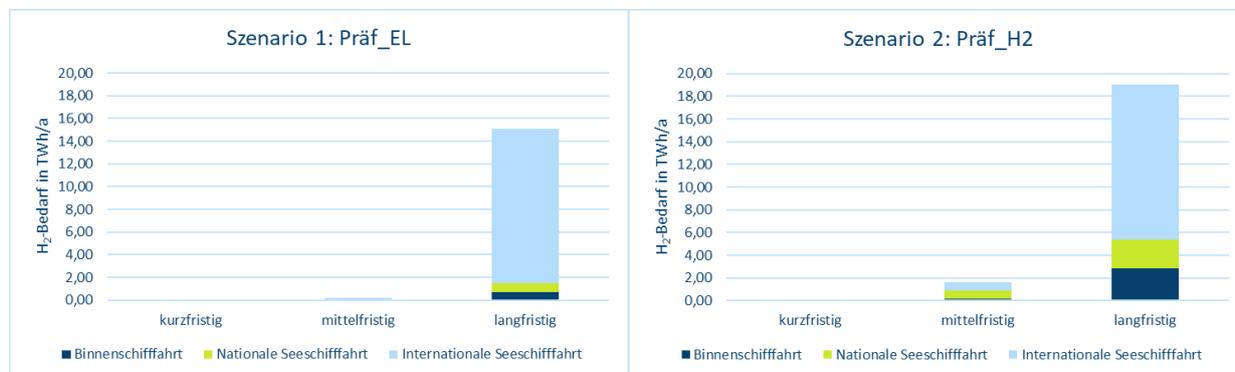


Abbildung 20: Bedarfe für Schifffahrt basierend auf NIR (Top-Down) entsprechend den beiden Szenarien Präferenz Elektrifizierung und Präferenz Wasserstoffanwendung

Die resultierenden H₂-Bedarfe des Bottom-Up-Ansatzes werden in Abbildung 21 für Binnen- und Seeschifffahrt je Schiffstyp dargestellt. Es handelt sich um den Bedarf, der durch die deutsche Flotte weltweit zu erwarten ist. Die Hochseeschifffahrt erzeugt einen wesentlich höheren H₂-Bedarf mit langfristig bis zu ca. 114 TWh/a bzw. 3,5 Mio. t/a im Vergleich zur Binnenschifffahrt mit langfristig bis zu 3,8 TWh/a bzw. 110.000 t/a. Mittelfristig sind weniger als 10 % des vermutlichen Gesamtbedarfs erreicht. Auch um wirtschaftliche Umrüstung zu ermöglichen, werden daher die meisten Schiffe mit Restlebensdauern von ca. 10 Jahren nicht mehr umgerüstet und der Großteil der Nachfrage korreliert daher mit der Einführung der entsprechenden Ersatzflotte Anfang der 30er-Jahre.

Es zeigt sich, dass die Abweichungen zwischen Szenario 1 und 2 in der Binnenschifffahrt prozentual größer sind als in der Seeschifffahrt, begründet durch die starke Dominanz von batterieelektrischen Antrieben in Szenario 1. Diese entspräche jedoch nicht unbedingt der technisch optimalen Lösung und wäre stark durch politische Rahmenbedingungen bedingt. Sowohl in der Binnen- als auch in der Seeschifffahrt erzeugen Frachtschiffe mit Abstand den größten H₂-Bedarf. Mittelfristig wird durch die Fährschifffahrt der größte Bedarf erzeugt.

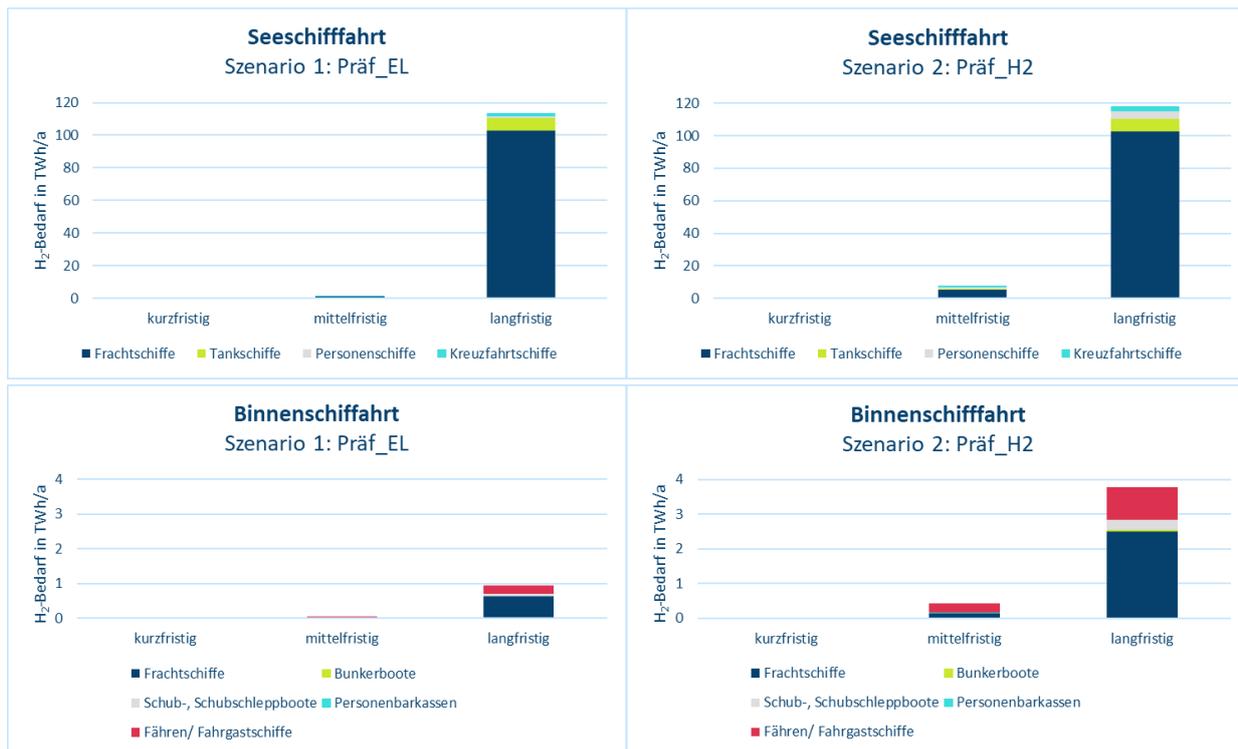


Abbildung 21: Bedarfe für Schifffahrt basierend auf Hochrechnung (Bottom-Up) entsprechend den beiden Szenarien Präferenz Elektrifizierung und Präferenz Wasserstoffanwendung

3.2.2. Häfen

Für Häfen wurden die Bereiche Stromverbrauch, Gebäudewärme und Hafenumschlaggeräte auf Basis unterschiedlich brauchbarer Datensätze betrachtet (Mischansatz). Insbesondere im Bereich Stromverbrauch und Gebäudewärme sind öffentlich verfügbare Daten verhältnismäßig unvollständig und mit Unsicherheiten behaftet. So weisen Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichte verschiedener Häfen große Unterschiede im spezifischen Energieeinsatz (2–15 kWh/tWarenumschlag) auf und haben häufig unklare Systemgrenzen. Zudem konzentrieren sich diese Berichte auf den Infrastrukturbetreiber, d. h., der Gesamthafen (inkl. Terminalbetreiber) wird nicht vollständig betrachtet.



Für Hafenumschlaggeräte wird als Berechnungsbasis die Studie Alternative Antriebe für Hafenumschlaggeräte¹³⁰ gewählt, da diese die CO₂-Emissionen je Gerätetyp für See- und Binnenhäfen angibt. Wie in Kapitel 1.3.2 dargelegt, kann über die CO₂-Emissionen je Energie für Diesel (263,69 gCO₂/kWh) der Energieeinsatz bzw. Kraftstoffbedarf bestimmt werden. Über den Wirkungsgrad des Dieselmotors (35 %), Annahmen zur H₂-Marktdurchdringung und den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle (50 %) wird der H₂-Bedarf ermittelt. Die Annahmen zur H₂-Marktdurchdringung wurden für beide Szenarien individuell je Gerätetyp entwickelt. Sie richten sich nach der in Kapitel 2 durchgeführten Analyse und technischen Limitierungen von batterie- bzw. H₂-BZ-betriebenen Hafenumschlaggeräten wie bspw. Ladezyklen, Betriebszeiten, Tragfähigkeit und Leistung. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle richtet sich nach dem von bereits verfügbaren Hafenumschlaggeräten.

¹³⁰ (Ramboll 2022).

Der H₂-Bedarf für den Bereich Wärme und (Land-)Strom wird über den im Rahmen von GreenPorts publizierten Energieeinsatz für den Hafen Bremen¹³¹ ermittelt. Diese Datenbasis wurde gewählt, da sich der spezifische Energieeinsatz im Mittelfeld im Vergleich zu Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichten von Hafen-Infrastrukturbetreibern bewegt und der gesamte Hafen betrachtet wird. Zunächst wird der Nutzenergiebedarf unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade bestimmt. Der H₂-Bedarf kann über den Warenumschatz (Bremerhaven zu Deutschland), die H₂-Marktdurchdringung und Wirkungsgrade hochgerechnet werden.

Es wird zugrunde gelegt, dass der Strombedarf am Hafen aufgrund der zunehmenden Landstromversorgung weiter steigen wird. Im Szenario Präferenz Wasserstoff wird davon ausgegangen, dass die entstehenden Leistungsspitzen über Brennstoffzellen teilweise ausgeglichen werden müssen.

Tabelle 30: Häfen: Annahmen je Szenario

	Szenario Präferenz Elektrifizierung	Szenario Präferenz Wasserstoff
Kurzfristig	<ul style="list-style-type: none"> • Pilotprojekte für Hafenumschlaggeräte (siehe auch Tabelle 17) 	
Mittelfristig	<ul style="list-style-type: none"> • Umstellung Hafenumschlaggeräte auf (batterie-)elektrische Varianten (Anteil H₂ < 10 %) • Umstellung auf Landstromversorgung (ohne H₂) 	<ul style="list-style-type: none"> • Umstellung Hafenumschlaggeräte auf H₂ und (batterie-)elektrische Varianten (Anteil H₂ ca. 20 %) • Umstellung Gebäudewärme und Landstromversorgung teilweise auf H₂
Langfristig	<ul style="list-style-type: none"> • Hafenumschlaggeräte auf (batterie-)elektrische Varianten umgestellt (Anteil H₂ < 20 %) • Gebäudewärme Beimischung H₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Marktdurchdringung H₂ bei Hafenumschlaggeräten (Anteil H₂ ca. 50 %) • Gebäudewärme und Landstromversorgung teilweise H₂ (Anteil H₂ 25–50 %)

Wie in Abbildung 22 dargestellt, erzeugen Seehäfen im Bereich der Hafenumschlaggeräte den Hauptteil des H₂-Bedarfs. Der größte Marktanteil wurde für Stapler und Zugmaschinen angenommen, aufgrund des aktuell hohen Energiebedarfs durch Van / Straddle Carrier entsteht jedoch der kumuliert höchste H₂-Bedarf durch diese Fahrzeugklasse. Insgesamt kann durch Hafenumschlaggeräte ein H₂-Bedarf von bis zu ca. 167 GWh/a bzw. 5.000 t/a erwartet werden, davon ca. 157 GWh/a bzw. 4.700 t/a durch Hafenumschlaggeräte in Seehäfen. Im Falle einer Präferenz für Batterieelektrifizierung ist der H₂-Bedarf deutlich niedriger, da nur wenige Anwendungen den Einsatz von Wasserstoff technisch benötigen (ca. 48 GWh/a bzw. 1.400 t/a).

¹³¹ (Metzner 2021).

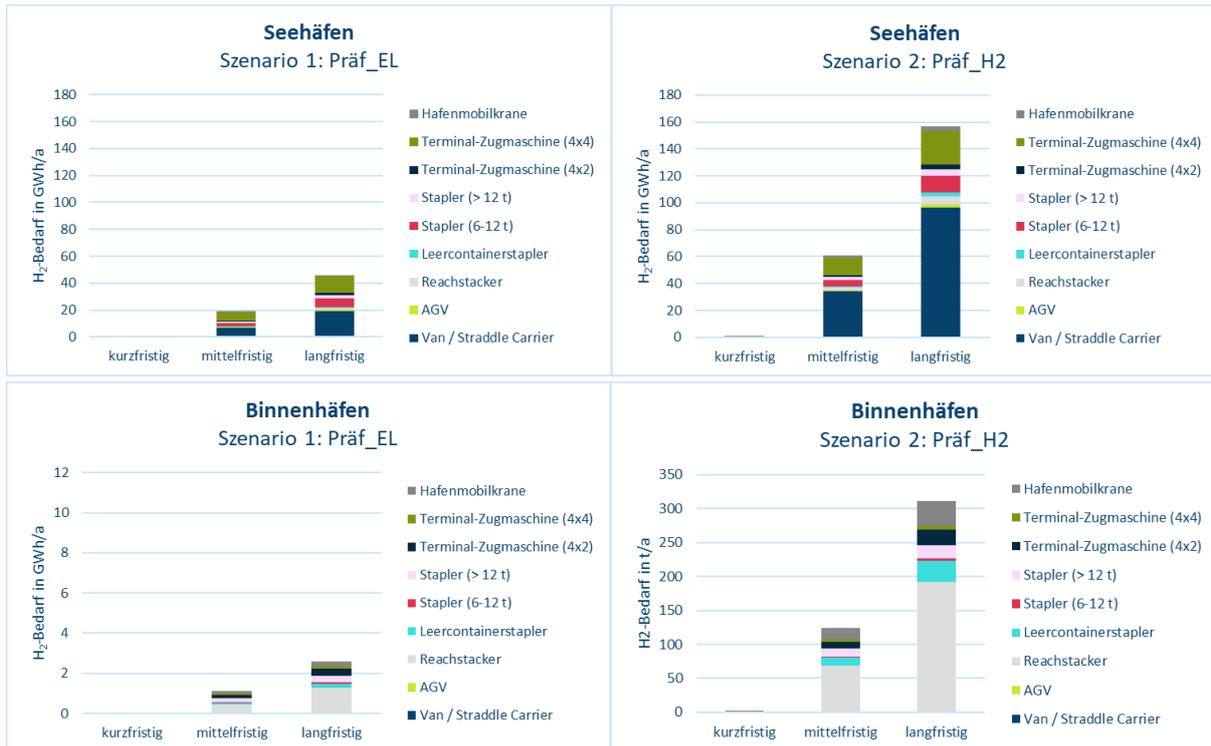


Abbildung 22: Bedarfe für Hafenumschlaggeräte entsprechend den beiden Szenarien Präferenz Elektrifizierung und Präferenz Wasserstoffanwendung

Die Bedarfe in den beiden Szenarien für See- und Binnenhäfen werden in Abbildung 23 dargestellt. Zwischen den beiden Szenarien ist für die Betrachtung der Hafenumschlaggeräte, der (Land-)Stromversorgung und Wärme eine Abweichung von ca. 833 GWh_{H2}/a bzw. 25.000 t_{H2}/a für Seehäfen und ca. 526 GWh_{H2}/a bzw. 15.800 t_{H2}/a für Binnenhäfen festzustellen. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die Annahmen im Bereich der (Land-)Stromversorgung. In Szenario 2 wird davon ausgegangen, dass Leistungsspitzen durch stationäre Brennstoffzellen am Hafen abgefangen werden müssen. Der zu erwartende H₂-Bedarf durch Wärme ist nur in Szenario 1 für Binnenhäfen von Bedeutung.



Abbildung 23: Bedarfe für Häfen (Mischansatz) entsprechend den beiden Szenarien Präferenz Elektrifizierung und Präferenz Wasserstoffanwendung

Die Ergebnisse im Bereich der Häfen unterliegen durch die unsichere, teils widersprüchliche Datengrundlage großen Unsicherheiten. Insbesondere für die Betrachtung von Strom und Wärme im Bereich der Binnenhäfen auf Basis von Zahlen eines Seehafens ist als kritisch zu bewerten. Aus Mangel an Daten konnten außerdem weitere Hafenfahrzeuge wie Rangierloks nicht betrachtet werden, die jedoch als Wasserstoffanwender prädestiniert wären. Auch ob Brennstoffzellen tatsächlich zukünftig Leistungsspitzen für die Landstromversorgung abdecken müssen, hängt stark vom lokalen Ausbau der Netze und somit weiteren schwer vorhersehbaren Parametern ab.

3.2.3. Schiffbau und Zulieferer

Wie in Kapitel 1.4 genauer beschrieben, wurden auf Basis der Input-Output-Tabellen¹³² sowie sektorspezifischer Energieverbräuche¹³³ der Gesamtenergieverbrauch im Schiffbau sowie die anteiligen Energieverbräuche des Schiffbaus in den wesentlichen Zulieferindustrien berechnet. Diese Datensätze und Verhältnisse dienen für die weitere Berechnung des Wasserstoffbedarfs als Grundlage.

Im Folgenden werden die Annahmen beschrieben, die für die beiden Szenarien der Hochrechnung zugrunde liegen.

¹³² (DESTATIS 2020).

¹³³ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Verwendung/Tabellen/kohle-erdgas-strom.html>, zuletzt abgerufen am 16.05.2023.

Tabelle 31: Schiffbau und Zulieferer: Annahmen je Szenario

	Szenario Präferenz Elektrifizierung	Szenario Präferenz Wasserstoff
Kurzfristig	<ul style="list-style-type: none"> Geringfügige Verbräuche durch Hydridspeicherproduktion und Demoprojekte 	
Mittelfristig	<ul style="list-style-type: none"> Ausschließlich Elektrifizierungsschritte in Werften Zulieferer setzen ebenfalls wesentlich auf Elektrifizierung 	<ul style="list-style-type: none"> Zumischung H₂ zu Erdgas (2 %) Aktuelle BHKW laufen mit H₂ Flurförderzeuge sind BZ
Langfristig	<ul style="list-style-type: none"> Stahlbranche: Basis Überblicksstudie der Hans-Böckler-Stiftung¹³⁴ Zulieferer: Ersatz Erdgas nur für „high-grade“-Wärme Werften: Erdgas wird nur teilweise direkt durch H₂ ersetzt 	<ul style="list-style-type: none"> Vollständiger Ersatz Erdgas (Werften und Zulieferer) Großwerften mit Synergie BHKW: 30 % elektrische Energie wird vor Ort (durch H₂) erzeugt Stahlbranche: Basis Überblicksstudie der Hans-Böckler-Stiftung¹³⁵

Grundsätzlich gilt im Schiffbau sowie der Zulieferindustrie, dass kurzfristig außer den Verbräuchen in wenigen Spezialanwendungen (insbesondere Hydridspeicherproduktion) sowie Demonstrationsprojekten keine Wasserstoffbedarfe zu erwarten sind.

Mittelfristig ist die Stahlbranche als wesentlicher Zulieferer jedoch ein relevanter „First Mover“, der unabhängig von den Präferenzen und Entwicklungen der maritimen Branche eine Dekarbonisierung über Wasserstoff anstrebt. Für die weiteren Zuliefersektoren ist angenommen, dass diese entsprechend den politischen Zielpfaden¹³⁶ mittelfristig etwa ein Drittel des Verbrauchs CO₂-neutral realisieren müssen. Für das Präferenzszenario Elektrifizierung ist hier eine vollständige Umsetzung durch (batterie-)elektrische Lösungen angenommen, während für das Präferenzszenario Wasserstoff ein Zumischungsszenario zum Erdgasverbrauch von 2 %¹³⁷ angenommen wird.

Auf den Werften selbst wird im Präferenzszenario Wasserstoff folgende Umsetzung angenommen: Flurförderzeuge mit Brennstoffzellenantrieb, Umsetzung bestehende BHKW mit Wasserstoff sowie die angesprochene Wasserstoffbeimischung im Erdgasnetz. Probefahrten, die heute auch wesentliche Anteile des Energiebedarfs bei (Neubau-)Werften ausmachen, werden aufgrund nicht vorhandener Daten als „erste Fahrt“ und damit als vernachlässigbarer Anteil dem Kapitel Schifffahrt zugeordnet.

Langfristig wird im Schiffbau unter optimistischer Annahme (Präferenzszenario Wasserstoff) die Synergie von Strom- und Wärmeerzeugung im BHKW genutzt, welche die Großwerften¹³⁸ (über zwei Drittel des Gesamtenergiebedarfs) für Hallen und Schweißprozesse haben. Dadurch werden neben dem vollständigen Erdgasersatz zusätzlich Wasserstoffbedarfe über die Abdeckung eines Anteils des Strombedarfs erzeugt.

In der Zulieferindustrie wird in erster optimistischer Näherung davon ausgegangen, dass alle Prozesse, die heute durch Erdgas realisiert sind, durch Wasserstoff ersetzt werden; für die Stahlbranche sind erneut die konkreten H₂-Bedarfs-Hochrechnungen der Hans-Böckler-Stiftung angenommen und anteilig auf den

¹³⁴ (HANS-BÖCKLER 2022).

¹³⁵ (HANS-BÖCKLER 2022).

¹³⁶ <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html>, zuletzt abgerufen am 03.07.2023.

¹³⁷ Unter Annahme einer nur lokal beginnenden Beimischung von 20 % bei 10 % der Verbraucher.

¹³⁸ Hier im Wesentlichen bezogen auf die BRZ der gebauten Schiffe.

Schiffbau umgerechnet. Im Szenario der Elektrifizierung wird nur der besonders schwer zu elektrifizierende Teil der „high-grade“-Wärme durch Wasserstoff realisiert.

Die hier getroffenen mittel- und langfristigen Annahmen gehen tendenziell davon aus, dass die oben genannten externen Faktoren (insbesondere lokale Verfügbarkeit) jeweils gegeben sind. Somit enthalten sie implizit einen Fokus auf die maritime Branche als Akteur und weniger als „Reakteur“.

Die geführten Gespräche im Schiffbau haben gezeigt, dass neben Energiesparmaßnahmen eine Direktelektrifizierung bevorzugt werden wird. Die Zulieferindustrie (außer Stahl und Metallverarbeitung) hat sich noch nicht ausführlich mit Wasserstoff als Teil der eigenen Dekarbonisierungsstrategien auseinandergesetzt. Ob Wasserstoff in Branchen außerhalb der genannten Stahl- und Metallbetriebe wesentliche Verbrauchsanteile erzeugt, ist insbesondere abhängig vom Einsatz bei der Erzeugung von Prozesswärme¹³⁹, die in vielen Fällen (insbesondere „low“ und „medium grade“) ebenfalls elektrisch erzeugt werden kann. Daher erscheint alles in allem für die Ermittlung der Gesamtzahlen in den Teilbranchen Schiffbau und Zulieferer das Elektrifizierungsszenario plausibler.

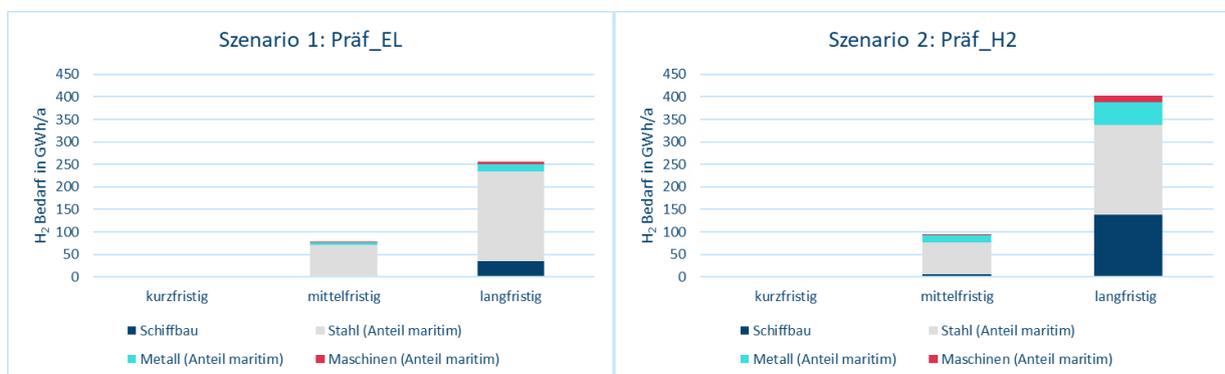


Abbildung 24: Bedarfe für Schiffbau und Zulieferer (Top-Down) entsprechend den beiden Szenarien Präferenz Elektrifizierung und Präferenz Wasserstoffanwendung.

Mittelfristig wird der Wasserstoffbedarf fast vollständig durch den Bedarf der Stahlindustrie abgebildet, (auch) da diese aktiv als „First Mover“ agiert. Langfristig bewegt sich der H₂-Bedarf entsprechend den beiden Szenarien zwischen ca. 250 und 400 GWh_{H₂}/a bzw. zwischen 8.000 und 12.000 t_{H₂}/a. Unabhängig vom Szenario wird der Wasserstoffbedarf hier ebenfalls trotz der kleinen Anteile der maritimen Branche am Gesamtverbrauch von Stahl in Deutschland durch die Stahlindustrie dominiert. Der Schiffbau selbst erzeugt unter den oben geschilderten optimistischen Annahmen einen Bedarf von bis zu 140 GWh_{H₂}/a bzw. 4.000 t_{H₂}/a.

3.2.4. Meerestechnik

Wie bereits in den voranstehenden Kapiteln erläutert, steht die Meerestechnik auch durch ihre forschungslastigen und kleinteiligen Energieverbraucher unter keinem akuten politischen Handlungsbedarf. Mögliche Großverbraucher sind in der deutschen maritimen Branche auch langfristig nicht zu erwarten. Somit wird von einer Abschätzung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs in der Meerestechnik abgesehen.

¹³⁹ (Ragwitz 2023) und Zitate darin.

4. H₂-BEDARF DER MARITIMEN BRANCHE IM VERGLEICH

4.1. Ermittlung des zukünftigen H₂-Bedarfs der maritimen Branche

Die Abschätzung und Hochrechnung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs (und Derivate) erfolgen auf der Grundlage der gewählten Methodik in Kapitel 3. Basierend auf den Annahmen der zwei definierten Szenarienansätze, einer präferierten Elektrifizierung der maritimen Teilbranchen mittels Batterien (= Min-Wert) und einer präferierten Wasserstoffnutzung (= Max-Wert), werden mögliche Bandbreiten für die H₂-Bedarfe, abhängig von den getroffenen Annahmen, dargestellt und diskutiert.

Langfristig wird für die maritime Branche ein Gesamtbedarf von über 119 TWh (> 3,5 Mio. Tonnen) Wasserstoff und Derivate pro Jahr abgeschätzt. Dies beinhaltet jedoch einen überwiegenden H₂-Bedarf der deutschen Handelsflotte, der außerhalb Deutschlands bzw. international bebunkert wird. Wie in Kapitel 3 erläutert, werden heute die (deutschen) Handelsschiffe vor allem international bebunkert. Verfügbare Daten zu Bunkermengen der internationalen Seeschifffahrt, die in Deutschland bebunkert werden, liegen nur unvollständig vor und sind nur bedingt aussagekräftig.

Die folgende Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse der Hochrechnung des potenziellen H₂-Bedarfs für die maritimen Teilbranchen (Seeschifffahrt, Binnenschifffahrt, Seehäfen, Binnenhäfen und Schiffbau/Zulieferer). Dabei wird eine Bandbreite (aus den Min-Max-Szenarien) für die kurz-, mittel- und langfristigen H₂-Bedarfe dargestellt.

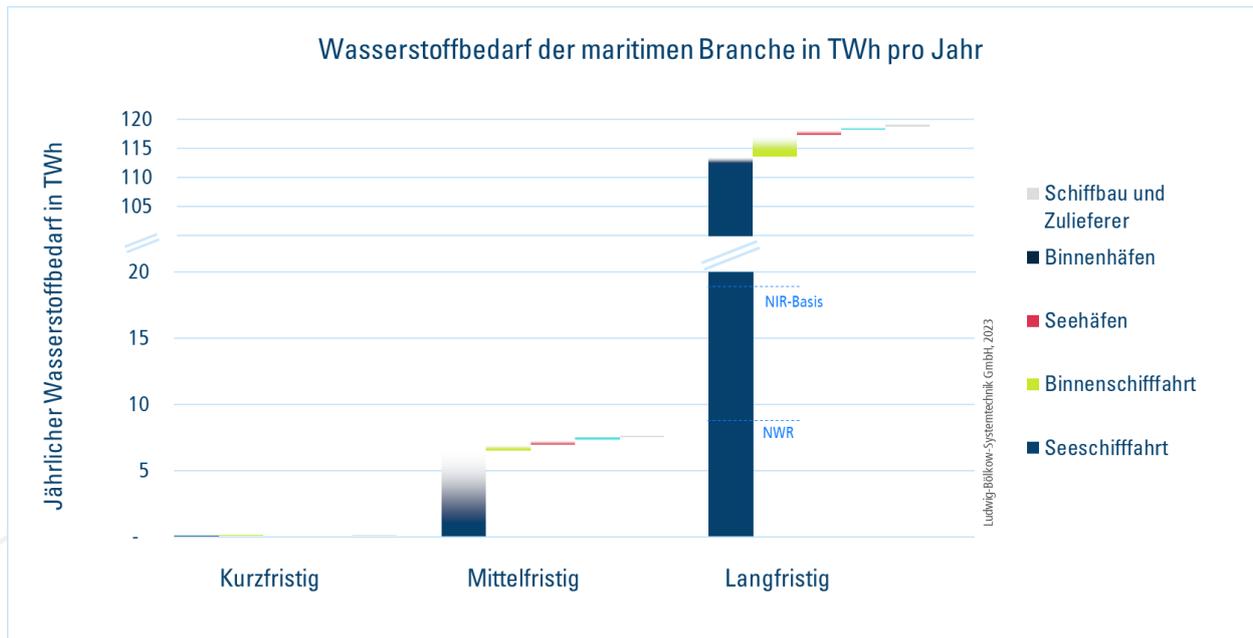


Abbildung 25: Abschätzung der H₂-Bedarfe (und Derivate) für die deutsche maritime Branche

Hier zeigt sich, auch entsprechend der aktuellen Verteilung des Energiebedarfs (Kapitel 1), dass der Wasserstoffbedarf der maritimen Branche kurz-, mittel- und langfristig durch die Schifffahrt (mit über 90 % Anteil) und durch die Hochseeschifffahrt im Speziellen dominiert werden wird.

Neben den Bedarfen der internationalen Seeschifffahrt an H₂ bzw. Derivaten in Höhe von über 114 TWh (3,4 Mio. Tonnen) pro Jahr können vor allem Binnenschiffe lokale und regionale Bedarfe generieren. Im Falle einer Umstellung auf grünen Wasserstoff könnte langfristig ein Bedarf zwischen ca. 1 und 3,8 TWh

(30.000 bis 115.000 Tonnen) pro Jahr in Deutschland entstehen bzw. mittelfristig (2030) zwischen 0,03 und 0,5 TWh (1.000 bis 15.000 Tonnen) pro Jahr. Allein diese Bandbreite der möglichen Entwicklung der H₂-Bedarfe (sowohl zwischen den Min.- und Max.-Szenarien wie auch zwischen den Zeithorizonten 2030 und 2045) zeigt auch, wie relevant die technischen und regulatorischen Entwicklungen der nächsten Jahre sind bzw. Einfluss auf die weiteren H₂-Bedarfe nehmen können.

Wie diese Betrachtung zeigt, können insbesondere auch deutsche (See-)Häfen zunehmend eine wichtige Rolle bei der Bunkerung und Bereitstellung von grünem H₂ und Derivaten einnehmen. Bereits heute wird in Deutschland umgerechnet eine Energiemenge von knapp 20 TWh pro Jahr an deutschen Häfen bebunkert¹⁴⁰. Der überwiegende Teil davon entfällt mit knapp 70 % auf internationale Seeschiffe, gefolgt von der Binnenschifffahrt mit 15 % und der nationalen Seeschifffahrt mit 13 %. In einer Hochrechnung dieser Datenbasis ergibt sich ein potenzieller H₂-Bedarf von ca. 17 TWh (500.000 Tonnen) H₂ pro Jahr.

Schiffbau, Zulieferindustrie und Meerestechnik hingegen werden selbst bei aktiver Einführung von Wasserstoff (Präferenz Szenario Wasserstoff) nur geringe Anteile innerhalb der maritimen Branche ausmachen und zusätzlich zeigt sich hier eine Tendenz zur Direktelektrifizierung.

4.2. Sensitivitäten, Diskussion und Einordnung

Für die maritime Branche als Ganzes liegen keine Abschätzungen zum Wasserstoffbedarf in der Literatur vor. Im Kontext des nationalen Wasserstoffrats (NWR)¹⁴¹ wurde jedoch eine Abschätzung für die Teilbranche Schifffahrt vorgenommen. Für 2030 werden hierfür 0,5–2,5 TWh (0,02–0,08 Mio. Tonnen)¹⁴² und langfristig (2040–2050) ca. 8 TWh (0,25 Mio. Tonnen) pro Jahr angegeben (siehe auch Abbildung 25 – NWR Schifffahrt). Dabei wird unterschieden zwischen ambitionierteren Bedarfen, welche die maritime Branche unterstützt¹⁴³, und einer Einschätzung basierend auf dem aktuellen politischen Umfeld. Der VDMA hatte zusammen mit dem VSM eine PtX-Roadmap zur maritimen Energiewende publiziert¹⁴⁴, die als Grundlage für die Abschätzungen für den nationalen Wasserstoffrat diente.

Weltweit wird ein Bedarf von jährlich ca. 30 Mio. Tonnen Wasserstoff für die Schifffahrt diskutiert¹⁴⁵. Diese Zahlen passen gut zu den Einschätzungen in dieser Studie, da die deutsche Handelsflotte etwa 12,5 % der weltweiten Containerschiffkapazitäten verfügt¹⁴⁶. Die im Juli 2023¹⁴⁷ formulierte neue Zielsetzung durch die IMO lässt vermuten, dass 30 Mio. Tonnen Wasserstoff als ein Mindestwert zu verstehen ist. Insbesondere durch FuelEU Maritime¹⁴⁸ wurde ein regulatorischer Rahmen geschaffen, der relativ ambitionierte Ziele bezüglich CO₂-Reduktion und Einsatz von CO₂-neutralen Kraftstoffen formuliert hat.

¹⁴⁰ Siehe: Umweltbundesamt, German Informative Inventory Report, Link: [\[German Informative Inventory Report\]](https://www.umweltbundesamt.de) ([umweltbundesamt.de](https://www.umweltbundesamt.de)), zuletzt abgerufen am 10.07.2023.

¹⁴¹ (NWR 2023).

¹⁴² Es bestätigt sich die große Bandbreite, die insbesondere mittelfristig von vielen weiteren Parametern abhängt.

¹⁴³ Zum Beispiel: VDR setzt sich für Reduzierung der CO₂-Emissionen der Schiffe auf „Netto-Null“ bis 2050 ein. <https://www.reederverband.de/de/themen/umwelt-und-klimaschutz-auf-gutem-kurs>, zuletzt abgerufen 04.07.2023.

¹⁴⁴ (VDMA/VSM 2022).

¹⁴⁵ Eigene Berechnung auf Basis von (Maersk Mc-Kinney 2022) (stöchiometrischer Anteil an Derivaten).

¹⁴⁶ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Branchenfokus/branchenfokus-maritime-wirtschaft-04.html>, zuletzt abgerufen am 10.07.2023.

¹⁴⁷ Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Studie (Juli 2023) wird durch die IMO eine deutliche Verschärfung der Dekarbonisierungsziele diskutiert und beschlossen, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted-.aspx>, zuletzt abgerufen am 10.07.2023.

¹⁴⁸ Siehe: FuelEU Maritime initiative: Provisional agreement to decarbonise the maritime sector - Consilium (europa.eu), zuletzt abgerufen am 10.06.2023.

Dieser positioniert die europäische und damit auch die deutsche Schifffahrt als möglichen Vorreiter für die weltweite Dekarbonisierung der Schifffahrt. Erfahrungen im Bereich LNG haben gezeigt, dass europäische Entwicklungen durchaus kurzfristig auch weltweit umgesetzt werden können (vergleiche Aufbau Betankungsinfrastruktur). Gleichzeitig steht die maritime Branche unter einem enormen Preisdruck und auch wenn langfristig technische Lösungen durch Wasserstoff und Derivate am sinnvollsten sind, könnten mittelfristige Ziele vielfach auch über andere Maßnahmen erreicht werden. Rechtliche Vorgaben und Quoten sollten daher in Zeiten des Übergangs möglichst global wirksam sein, da ihre Einhaltung bzw. Erfüllung den Takt für den Einsatz von Wasserstoff und Derivaten vorgeben werden. Jede Anpassung der entsprechenden Rahmenbedingungen wird somit auch zu einem mittelfristig erhöhten Bedarf führen.

Die getroffenen Annahmen sind insbesondere mittelfristig mit hohen Unsicherheiten behaftet, da die vorliegende Analyse insbesondere mit Bezug auf Verfügbarkeit von Wasserstoff und Derivaten in erster Näherung von einem ausreichenden Hochlauf der Produktions- und Importkapazitäten ausgegangen ist. Natürlich führen die üblichen Marktmechanismen (Knappheit führt zu höheren Preisen) zu einem Rückkopplungsmechanismus, der im Einzelfall die nötige Einführung klimaneutraler Antriebe verzögern kann.

Die langfristige Entwicklung unterliegt insbesondere Unsicherheiten in Bezug auf bessere Effizienzen. So können energiesparende Maßnahmen wesentliche Beiträge zur Erreichung der Klimaziele leisten und so den Wasserstoffbedarf weiter drücken. Beispielsweise könnte auch der vermehrte Einsatz von Brennstoffzellen zu deutlich verbesserter Effizienz in Bezug auf die Einsatzmenge des Wasserstoffs führen.

Die lokale Verfügbarkeit von Wasserstoff und Derivaten ist für die maritime Branche insgesamt als weniger problematisch einzuschätzen. Da alle relevanten Szenarien zum Infrastrukturausbau die Küstenregionen im Nordwesten Deutschlands als Vorreiter einschätzen, sollte die Gesamtverfügbarkeit mit einer lokalen Verfügbarkeit korrelieren. Dies gilt beispielsweise nicht für Teile der süddeutschen Zulieferindustrie und schlecht angebundener Binnengewässer.

Zur Einordnung der Gesamtverfügbarkeit zeigt Abbildung 26 den heutigen industriellen (grauen) Wasserstoffverbrauch und potenziell zukünftige energetische (grüne) H₂-Bedarfe. Für die weitere Diskussion und Einordnung der sektoralen Anteile und Bedarfe werden dazu ausgewählte Beispiele für potenzielle Anwendungen und Anteile bzw. deren Größenordnungen vereinfacht dargestellt.

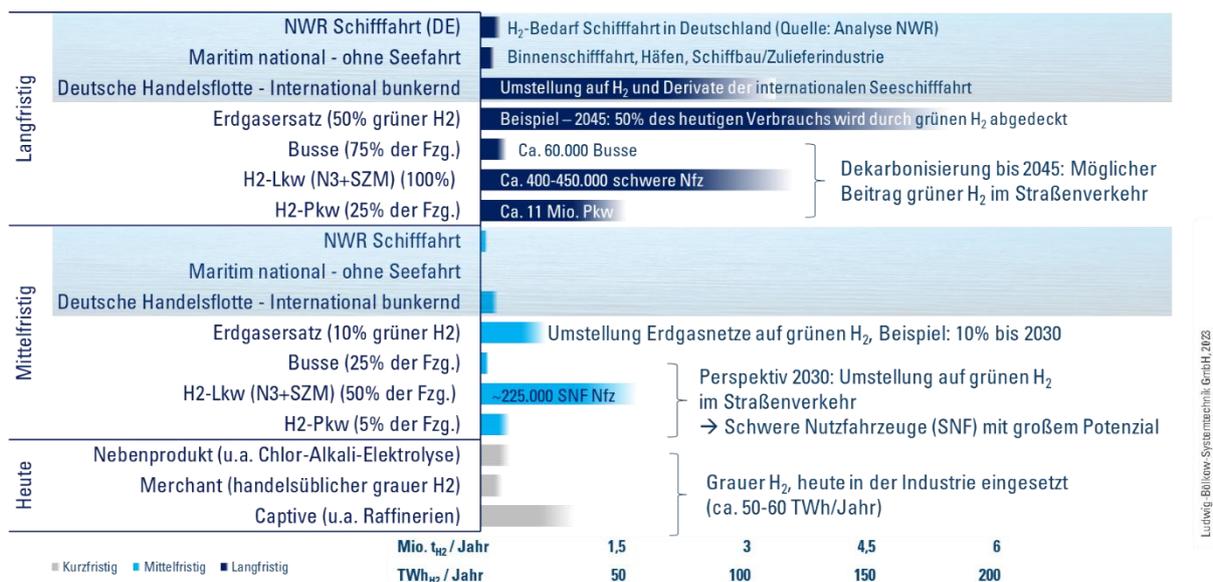


Abbildung 26: Einordnung der heutigen und erwarteten H₂-Bedarfe in TWh/a

Die heutige H₂-Nutzung in Höhe von 50–60 TWh/Jahr (ca. 1,5 bis 1,8 Mio. Tonnen H₂ pro Jahr) ist durch industrielle Anwendungen und grauen Wasserstoff aus fossilen Quellen bestimmt, v. a. für Raffinerien, Chemie, Industrie und das kommerzielle Gasgeschäft (Merchant). Neben der Substitution dieses grauen Wasserstoffs durch grünen können und müssen mittel- bis langfristig auch fossile Energieträger im Verkehr wie im Energiesektor durch grünen H₂ ersetzt werden. Wie in der Grafik dargestellt, stellt beispielsweise die Umstellung schwerer Nutzfahrzeuge (SNF) ein großes H₂-Potenzial dar. Ergänzend zum Ziel der Elektrifizierung des Straßenverkehrs in Deutschland mit Batterien, u. a. 15 Millionen Pkw mit Batterieantrieb bis 2030, kann eine Umstellung aller 450.000 Lkw ab einem zulässigen Gesamtgewicht von 18 Tonnen und der Lkw mit Sattelzugmaschinen (SZM) einen relevanten Beitrag zur Emissionsminderung im Straßenverkehr erzielen.¹⁴⁹

Die Umstellung und Dekarbonisierung der Gasnetzinfrastruktur würde einen weiteren großen H₂-Bedarf in Deutschland bedeuten. In der Darstellung sind beispielsweise 10 % des heutigen Gasbedarfs bis 2030 und 50 % bis 2045 angenommen, die durch erneuerbaren Wasserstoff ersetzt werden könnten. Dies verdeutlicht nochmals die enormen Energiemengen, die heute über das Gasnetz zur Wärme- und Stromerzeugung bzw. für stoffliche Prozesse bereitgestellt und in den nächsten Jahren und Jahrzehnten ersetzt werden müssen.

Mit Blick auf die maritimen Teilbranchen wird deutlich, dass unter den getroffenen Annahmen, siehe Kapitel 4.1, v. a. die Umstellung der deutschen Handelsflotte auf grünen Wasserstoff bzw. Derivate einen ähnlich hohen Bedarf an grünen Kraftstoffen generieren kann wie Umstellungen des Gasnetzes oder des Lkw-Verkehrs in Deutschland. Jedoch würden diese Bedarfe der deutschen Handelsflotte nicht allein in Deutschland entstehen, sondern eine internationale Kraftstoffbereitstellung bzw. Bunkern erfordern. Neben der Binnenschifffahrt könnte auch der Schiffsverkehr (Personen und Fracht) entlang der Küste bzw. im europäischen Seegebiet einen steigenden und regionalen Bedarf an grünem Wasserstoff generieren.

¹⁴⁹ CO₂-Minderung durch Umstellung von 15 Millionen Pkw auf Batteriefahrzeug mit grünem Strom = 20 % (Ziel Bundesregierung bis 2030), Umstellung aller schweren Nutzfahrzeuge (SNF) auf grünen H₂ = weitere 20 %; Umstellung von weiteren 11 Mio. Pkw auf grünen H₂ entspricht Anteil von 25 % des heutigen Pkw-Bestandes.

5. ERGEBNISSE UND ERKENNTNISSE DER STUDIE

Die maritime Branche steht vor der großen Herausforderung einer Dekarbonisierung aller Teilbranchen bis 2045. Dabei stellt sich ein sehr heterogenes Bild hinsichtlich der Ausgangssituation und der Perspektiven dar. Dies wird vor allem bedingt durch

- **die zahlreichen und unterschiedlichen Akteure** (u. a. Reedereien, Werften, Verbände, Hafeninfrastukturbetreiber, Terminalbetreiber, Maschinenbau und Zulieferindustrie, Meerestechnik und lokale Behörden sowie Landes- und Bundesministerien, EU und internationale Gremien usw.),
- **die zeitlichen Umsetzungshorizonte** (z. B. kurzfristiger Handlungsdruck der Kommunen und damit für betroffene Häfen und Binnenschiffe gegenüber internationalen Entwicklungen und Abstimmungsprozessen in Gremien in den kommenden Jahren und Jahrzehnten, insbesondere für die internationale Seeschifffahrt),
- **die geografische Abgrenzbarkeit** (v. a. der internationalen Seeschifffahrt mit weltweit verteilten Bunkerstandorten und Infrastrukturanforderungen),
- **die verfügbaren technologischen Ansätze** (sowohl erneuerbarer Kraftstoffe wie auch der Marktverfügbarkeit von geeigneten Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren für ausgewählte erneuerbare Kraftstoffe),
- **die regulatorischen Vorgaben** (u. a. nationale / europäische Vorgaben gegenüber internationalen Vorgaben)
- und **die Entwicklungsperspektiven** (der Märkte, des weltweiten und regionalen Handels, von Produkten und Standards, der geopolitischen Entwicklungen sowie vor allem des Zubaus und der (regionalen) Verfügbarkeiten erneuerbarer Energien).

Wesentliche Treiber für die Erreichung der Klimaneutralität der maritimen Branche sind klare politische Zielsetzungen und Rahmenbedingungen. Für einen erfolgreichen Hochlauf maritimer Anwendungen mit grünem H₂ bzw. Derivaten sind Investitionssicherheit und einheitliche Standards bzw. Kraftstoffinfrastrukturen schnellstmöglich abzustimmen und zu schaffen.

Unsicherheit herrscht insbesondere hinsichtlich der zukünftigen Kraftstoffwahl je maritimer Teilbranche und der damit verbundenen Verfügbarkeiten (v. a. Wahl grüner Kraftstoffe und Perspektive für Planbarkeit von Kosten und Preisen). Zudem besteht auch hinsichtlich batterieelektrischer Lösungen gegenüber H₂ / Derivaten eine Unsicherheit für einige Anwendungen der Binnenschifffahrt und für Anwendungen am Hafen. So wäre der Aufbau einer abgestimmten Infrastruktur statt mehrerer paralleler Investitionen für einzelne Applikationen aus systemischer Sicht erstens deutlich effizienter und zweitens böte dies die nötige Investitionssicherheit der Endanwender. Eine frühzeitige Abstimmung und gemeinsame Planung der zukünftigen Strom- und erneuerbaren Kraftstoffinfrastrukturen sollten nun im Vordergrund stehen und aktiv für Hafenstandorte angegangen werden, um u. a. Synergien zwischen Industrieanlagen, Tankstellen, Gasleitungen (Transport und Verteilnetze), Stromtrassen und Umspannwerken wie auch zukünftiger Import-Terminals zu nutzen und aktiv mit den Akteuren zu erschließen.

Technisch sind die meisten energieverbrauchenden Prozesse bereits mit H₂ / Derivaten umsetzbar. Nur wenige Ausnahmen, wie spezifische Prozesse in der Zulieferindustrie, erfordern weitergehende Lösungsansätze. Grüner Wasserstoff und Derivate können technologisch in den nächsten Jahren und

Jahrzehnten die heutigen fossilen Energieträger für maritime Anwendungen ablösen und die Energiewende der maritimen Branche einleiten.

Schifffahrt – Schlagmann für die maritime Energiewende

Unter den maritimen Teilbranchen hat die Schifffahrt mit über 90 % den mit Abstand größten Anteil des Energieverbrauchs und damit an den verursachten Emissionen. Die internationale Schifffahrt hat zudem sehr hohe Anforderung an die Energiespeicherung und Systemleistungsdichte der Energieversorgung.

Internationale Entwicklungen (insbesondere der Preise und Verfügbarkeiten erneuerbarer Kraftstoffe) sind zentrale Parameter für den wirtschaftlichen Betrieb – insbesondere für den Transport von Gütern, z. B. durch Containerschiffe. Aufgrund der weiten Entfernungen (v. a. interkontinentalen Seereisen) und internationalen Verflechtungen des Gütertransports wird hier der Einsatz von Derivaten und Verbrennungsmotoren (VM) favorisiert. Heute werden beispielsweise sogenannte „Dual-Fuel-Motoren“ als Übergangslösung entwickelt, um große Frachtschiffe sowohl mit Derivaten als auch mit herkömmlichen Schiffskraftstoffen versorgen zu können.

Im Gegensatz zur Frachtschifffahrt unterliegt die Personenschifffahrt einem zunehmenden Druck (auch durch die mitfahrenden Kunden), Emissionen zu reduzieren und aktiv Beiträge zur Nachhaltigkeit für (Urlaubs-)Reisen für Kunden auszuweisen und mit anzubieten.

Für den Einsatz alternativer Kraftstoffe in der Schifffahrt fehlt (bzw. ist unzureichend) aktuell auch noch der regulatorische Rahmen. Es ist wichtig, hier einen Standard für die Schiffsanwendungen mit den Akteuren abzustimmen und gezielt die Rahmenbedingungen für eine schnelle und wirtschaftliche Einführung zu schaffen.

Im Folgenden werden zentrale Ergebnisse und Erkenntnisse für die Schifffahrt zusammengefasst:

Internationale / interkontinentale Seeschifffahrt, v. a. Containerschiffe:

- **Perspektive:** Derivate und Verbrennungsmotoren (VM) sind die vielversprechendste Lösung für die Dekarbonisierung der Teilbranche, vor allem aufgrund der hohen Leistungsanforderungen und großen Bunkermengen, die für große Entfernungen (Ozeanüberquerungen) benötigt werden.
- **Chance:** Die deutsche Handelsflotte bunkert heute bereits überwiegend international. Bei einer Umstellung auf einen einheitlichen erneuerbaren Kraftstoff könnten weltweit ein Standard und der Aufbau einer weltweiten Infrastruktur international vorgebracht und beeinflusst werden – insbesondere auch im Rahmen der internationalen Gremien-/Regelwerkarbeiten.
- **Empfehlungen:** Eine Abstimmung der deutschen Akteure untereinander zu einer gemeinsamen Kraftstoffstrategie ist ein wichtiger zentraler Schritt für die Einführung eines erneuerbaren Kraftstoffes. Darauf aufbauend sollte in enger Abstimmung mit der Politik (den Bundesländern und der Bundesregierung) eine gemeinsame Position Deutschlands für eine Kraftstoffstrategie internationaler Seeschiffe gefunden werden. Auf europäischer Ebene soll im Austausch mit den europäischen Nachbarn eine gemeinsame europäische Strategie abgestimmt und eine Roadmap (weiter-)entwickelt werden, die in einem nächsten Schritt in internationalen Gremien von allen europäischen Delegierten gemeinsam eingebracht werden kann.

Internationale / europäische Seeschifffahrt, v. a. Fahrgastschiffe und Küstenschifffahrt:

- **Perspektive:** Für Kreuzfahrtschiffe mit vielen Fahrgästen und touristischen Fahrtrouten sind sicherheitsrelevante und genehmigungsrechtliche Aspekte von hoher Bedeutung. Zunehmend steht diese Kreuzfahrtbranche unter öffentlichem Druck, konkrete Beiträge und eine Strategie zur Nachhaltigkeit zu entwickeln und umzusetzen.
- **Chance:** Die Einführung von Elektroantrieben bzw. der Austausch von Verbrennungsmotoren ermöglicht neben der Reduktion von (lokalen) CO₂-Emissionen und Luftschadstoffen vor allem eine deutliche Minderung der Lärmemissionen. Heutige Verbrennungsmotoren bzw. Diesellaggregate könnten zukünftig auch durch modulare und skalierbare Brennstoffzellen (BZ), versorgt mit Methanol oder Wasserstoff, ersetzt werden. Anders als Verbrennungsmotoren (VM) arbeiten BZ hocheffizient im Teillastverhalten, können also – insbesondere in Kombination mit Batterien – auch Spitzenlasten abdecken und effizient Wärme und Kälteenergie bereitstellen (Trigeneration (KWKK – Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung) für Hotellast). Beispielsweise könnte die zukünftige Energieversorgung auf Kreuzfahrtschiffen durch mehrere auf dem Schiff dezentral verteilte BZ-Systeme abgedeckt und damit auch eine hohe Redundanz und Ausfallsicherheit geboten werden. Damit könnte zukünftig auf ein getrenntes Haupt- und Hilssystem verzichtet werden. Entlang der Küsten, z. B. in Europa, könnten auch gezielt Synergien mit dem Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur genutzt und erschlossen werden.
- **Empfehlungen:** Die Umrüstung der Fahrgastschiffe in Europa bzw. entlang der Küsten auf Brennstoffzellensysteme sollte gezielt vorangebracht werden. Die Nutzung von Synergien beim Aufbau einer H₂-Logistik (Druckwasserstoff – CGH₂) an den Küsten Europas (z. B. mit Straßenverkehr, Gasnetzen und Industriestandorten) eröffnet die Verfügbarkeit von Bunkeroptionen in Europa. Zusammen mit den Reedereien, den Werften und der Politik (Bundesland, Bund, EU) sollten ein einheitliches Vorgehen und ein Zeitplan entwickelt werden.

In Abstimmung mit den Häfen kann eine gemeinsame Strategie mit norddeutschen Ländern, dem Bund und den europäischen Nachbarn entwickelt werden, hin zu einer Versorgungsstrategie „grüner H₂ aus Offshore-Anlagen“. Mit der Entwicklung konkreter Fahrpläne bis 2030 und bis 2045 sollten auch mögliche Beiträge aus Offshore-Anlagen in der Nordsee und der Ostsee konkret mitgeplant werden. Darauf aufbauend können H₂-Mengen und -Beiträge für den European Hydrogen Backbone¹⁵⁰ und das deutsche Wasserstoffnetz aus maritimen Anwendungen abgeleitet und geplant werden.

Darin sollten insbesondere auch die Rolle und Chancen für die Kreuzschifffahrt in und für Europa herausgearbeitet werden und gezielt Synergien mit nationalen / europäischen Infrastrukturplanungen und H₂-Strategien erschlossen werden, u. a. europäische H₂-Strategie und die Rolle der europäischen Schifffahrt, Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur in Europa, z. B. AFIR¹⁵¹.

Dies könnte beispielsweise unter der Koordination und Federführung des Deutschen Maritimen Zentrums erfolgen, das sowohl die maritimen Akteure als auch die politischen Vertretungen zu Abstimmungen und gemeinsamer Ausarbeitung von Strategien und Zielen zusammenbringen kann.

¹⁵⁰ Siehe: <https://ehb.eu/>, zuletzt abgerufen am 11.07.2023.

¹⁵¹ European alternative fuels infrastructure regulation, siehe auch: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-afir-alternative-fuels-infrastructure-regulation/>, zuletzt abgerufen am 11.07.2023.

Binnenschifffahrt

- **Perspektive:** Neben der Elektrifizierung mit Batteriesystemen wird ein relevanter Teil der Binnenschiffe (v. a. Gütermotorschiffe, Fähren und größere Personenschiffe, insbesondere bei höheren Leistungsanforderungen) auf grünen H₂ / Derivate umgestellt werden müssen, um die Dekarbonisierungsziele zu erreichen. Die Integration alternativer Antriebssysteme in bestehende Schiffe (Retrofit) stellt jedoch aufgrund der geringeren Leistungsdichten der alternativen Antriebssysteme eine Herausforderung dar, die beispielsweise zu einer Minderung der Reichweiten bzw. häufigerer Bunkerung führen wird. Langfristig werden Neukonstruktion und an die erneuerbaren Kraftstoffe angepasste Designs hier optimierte Lösungsansätze bieten.
- **Chance:** Brennstoffzellenantriebe (bzw. Hybridsysteme in Kombination mit Batterien) bieten den Vorteil des (lokal) emissionsarmen Antriebs (CO₂, Feinstaub, Stickstoffoxide, Lärm). Dies ist insbesondere in urbanen Gebieten, in Tourismus- und Naturschutzgebieten mit strengen und steigenden Anforderungen an die Emissionen von großer Bedeutung und Vorteil.

Beim Aufbau einer neuen erneuerbaren Kraftstoffinfrastruktur können und sollten für Druckwasserstoff (CGH₂) Synergien mit dem Straßenverkehr und den Gasnetzen gezielt gesucht werden, z. B. für Nutzfahrzeuge, Busse, Bahnen und auch die Planungen für den Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur (AFIR) in Deutschland. Die Nutzung von Methanol bietet insbesondere an Industriestandorten Synergiepotenzial.

- **Empfehlungen:** Entwicklung einer Dekarbonisierungsstrategie für die deutsche Binnenschifffahrt mit Brennstoffzellenantrieb und der Nutzung von Wasserstoff. Dabei soll gezielt die Logistik und Infrastrukturplanung für CGH₂ in Abstimmung mit dem Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur im Straßenverkehr, der regionalen H₂-Strategien und vor allem der Häfen vorangebracht werden. Ein Großteil der heutigen Binnenschiffe wird im Rahmen der Dekarbonisierung nicht durch neue Schiffe (z. B. mit Neudesign) ersetzt werden, sondern aufgrund der Altersstrukturen und Nutzungsprofile nachgerüstet werden müssen (Retrofit). Für diese Schiffe sollten gezielt Bunkerstrategien bzw. Betankungsanlagen an den Flüssen (v. a. Rhein), Seen (z. B. Mecklenburg-Vorpommern, Bodensee) und Küstenregionen angepasst und bereitgestellt werden.

Häfen – Energie-Hubs der Energiewende

Häfen bieten die ideale Voraussetzung, Infrastrukturen für H₂ / Derivate gezielt mit den Akteuren aufzubauen. Es sollten spezifische Hafenkonzpte mit Zeithorizonten (weiter)entwickelt und umgesetzt werden. Häfen können als sogenannte „grüne Energie-Hubs“ die Energiewende in Deutschland und international voranbringen sowie eine entscheidende Keimzelle für die Weiterentwicklung und Umstellung der Energieinfrastruktur darstellen.

Häfen sind Umschlagplatz von Waren und Gütern, Logistikstandort mit Anbindung zum Straßen- und Schienenverkehr wie auch zu den Binnengewässern. Erneuerbare Kraftstoffe könnten hier nach Deutschland importiert und auch See- sowie Binnenschiffe bebunkert werden.

- **Perspektive:** Häfen stehen unter unmittelbarem Handlungsdruck, um zum einen die Emissionen (v. a. CO₂ und Luftschadstoffe) – insbesondere in urbanen Regionen – zu mindern und sich zum anderen auf neue mögliche Geschäftsfelder durch die Energiewende bzw. die sich verändernde Energieversorgung mit erneuerbaren Energien einzustellen bzw. aufzustellen. In vielen Häfen laufen dazu bereits Untersuchungen, Demonstrationsprojekte, Pilotvorhaben und Planungen. In Deutschland befassen sich

beispielsweise 15 Projekte mit der Implementierung von Wasserstoff an Häfen, z. B. Clean Port & Logistics (HHLA), enerPort II, Wash2Emden. Derzeit ist festzustellen, dass viele Häfen sowohl die Chancen als auch die Herausforderungen durch die Implementierung von H₂/ Derivaten erkannt haben. Daher ist bereits ein sehr großes Momentum in diesem Segment erkennbar. Aktuell wird eine nationale Hafenstrategie entwickelt, die eine Grundlage für die weiteren Detaillierungen ab 2024 darstellen kann.

- **Chance:** Durch H₂/ Derivate ergeben sich Möglichkeiten auch für neue bzw. erweiterte Geschäftsfelder für Häfen. So sind z. B. Standorte für den Import von Wasserstoff / Derivaten noch nicht vorhanden bzw. festgelegt. Auch die Lagerung und die Weiterverteilung (z. B. auf den deutschen Wasserstraßen) an Import-Standorten (Häfen) sind bisher nicht geplant. Häfen haben hier die Chance, vom Energieverbraucher zum Energiedienstleister zu werden. Auch das Bunkern von erneuerbaren Kraftstoffen hat zunehmend Potenzial für Häfen.
- **Empfehlungen:** Entwicklung von ganzheitlichen Konzepten zur Transformation der Häfen zu „Energie-Hubs der Energiewende“. Abstimmung der deutschen Seehäfen, wie Hamburg Hafen, Niedersachsen Ports, MV-Häfen und der lokalen Akteure (Unternehmen, Behörden) zu einer einheitlichen erneuerbaren Kraftstoffstrategie und externen Kommunikation.

Es wird empfohlen, die Entwicklung von ganzheitlichen Konzepten zur Transformation der Häfen zu „Energie-Hubs der Energiewende“ gezielt voranzubringen (z. B. in einzelnen Bundesländern und ihren Standorten oder in einer erweiterten Perspektive in einer Untersuchung des Bundes). Neben dem Import von Energie sollte hier insbesondere die Synergie bei der Umrüstung der Umschlaggeräte, der Anbindung der Logistik (Schiene, Straße, Binnenschifffahrt), der lokalen/regionalen Strom- und Wärmeerzeugung und die mögliche Rolle der Häfen zur Sicherung der Energieversorgung (u. a. Netzstabilität durch Brennstoffzellen-Anlagen) herausgearbeitet werden. Dazu sollten auch Fördermittel bzw. die Unterstützung durch die Bundesländer, des Bundes und der EU für Konzepte und Demoprojekte gezielt geprüft und genutzt werden.

Schiffbau und Zulieferindustrie – Innovatoren für die maritime Energiewende

Auch wenn Wasserstoff nur vereinzelt eine Rolle für die Dekarbonisierungsstrategien im Schiffbau und der Zulieferindustrie selbst gefunden hat, wird der Umbau der maritimen Branche nur mit dem „Know-how“ zur Antriebs- und Energieerzeugung und (energieeinsparenden) Hilfssystemen möglich sein.

- **Perspektive:** Wasserstoff und Derivate bergen hohes Potenzial zur Wertschöpfung innerhalb Deutschlands. Die Nachfrage nach erneuerbaren Kraftstoffen wird insbesondere für Zulieferer durch die Umstellung der Hochseeflotte erzeugt. Darüber hinaus bietet die Küsten- und Binnenschifffahrt für den Schiffbau, neben dem Spezialschiffbau, ein enormes Potenzial für zukünftig erforderliche Umbaumaßnahmen der Schiffe (Retrofit) und neue Schiffskonstruktionen (mit auf erneuerbare Kraftstoffe optimierten Designs).
- **Chance:** Erhalt und Neuausrichtung der Werften und Zulieferindustrie durch Spezialisierung, Vertiefung der Wertschöpfungskette und Vorsprung gegenüber billiger produzierenden Massenproduzenten. Fokussierung auf Brennstoffzellenantriebe mit Wasserstoffkonzepten und Methanol.
- **Empfehlungen:** Abstimmung mit den anderen maritimen Teilbranchen und den lokalen Behörden zur Strategieentwicklung für H₂ / Derivate. Unterstützung der Konzeptentwicklungen der Schifffahrt und Häfen. Außerdem gezielt mit spezifischen Produkten früh im Markt positioniert sein und eine

Vorreiterrolle etablieren, Erfahrung in Projekten sammeln und aufbauen, um so in den frühen 30er-Jahren vom erwarteten Hochlauf zu profitieren.

Meerestechnik – Erschließer für die maritime Energiewende

Die Meerestechnik ist als forschungslastige Teilbranche nur in Grenzen für die Abnahme von Wasserstoff geeignet, dafür wird die Rolle als Wasserstofferzeuger auf dem offenen Meer zunehmend wichtig.

- **Perspektive:** Die großen Mengen Wasserstoff werden zunehmend auf dem Meer direkt erzeugt werden. Dafür wird viel Infrastruktur aufgebaut und gewartet werden müssen (über und unter der Meeresoberfläche).
- **Chance:** Bau und Wartung von Energieerzeugungsanlagen in der Nordsee und Ostsee (u. a. Offshore-Anlagen, künstliche Inseln, Pipelines etc.). Erforschung und Umsetzung der zunehmenden Anforderungen an Sicherheit, Überwachung, Monitoring und Steuerung von Anlagen (u. a. autonome Systeme, Fahrzeuge, Anlagen).
- **Empfehlungen:** Neben Flächenplanung für Offshore-Windenergie explizite Berücksichtigung von Wasserstofferzeugung (z. B. durch Mitplanung Pipelines). Entwicklung einer abgestimmten Strategie von Meerestechnikern und Ausbau der (Offshore-)Wasserstoff-Infrastruktur, zum Beispiel unter der Moderation durch das DMZ als Ankerpunkt zwischen Offshore-Anbietern und anderen Sektoren.

Maritime Branche schafft Energiewende

Es wird empfohlen, dass das Deutsche Maritime Zentrum den weiteren Austausch innerhalb der Teilbranchen, wie auch über die ganze maritime Branche, mit der Industrie, den Reedereien, den Häfen, der Wissenschaft, der Verbände und den politischen Institutionen (Bundesländer, Bund und Europa) weiterführt und begleitet.

Hierzu könnte eine Koordinierungsplattform den passenden Rahmen geben und auch den Austausch zwischen den maritimen Teilbranchen mit den weiteren Sektoren und Akteuren der Energiewende unterstützen. Die maritime Branche kann hier wie kaum ein anderer Sektor entscheidende Rahmenbedingungen für die Energiewende schaffen – nicht nur in und für Deutschland, sondern international.

6. QUELLEN UND LITERATUR

- (Balance 2014) Balance Consulting, Shipyard Economics Ltd, MC Marketing Consulting, Competitive position and future opportunities of the European Marine Supplies Industry, Januar 2014
- (BordstromTech II 2023) Online-Seminar Zur Richtlinie über Zuwendungen zur Marktaktivierung alternativer Technologien für die umweltfreundliche Bordstrom- und mobile Landstromversorgung von See- und Binnenschiffen (BordstromTech II) Berlin, 30. März 2023
- (BSH 2023) Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Statistik der deutschen Handelsflotte ab BRZ 100, Stand: 31.01.2023
- (CWS 2017) Center für Wirtschaftspolitische Studien (CWS) des Instituts für Wirtschaftspolitik, Die regionalökonomische Bedeutung der Meyer Werft: Aktualisierung für die Jahre 2015 bis 2020, 2017.
- (dena 2021) Deutsche Energie-Agentur GmbH, Systematisch Energieeffizienz steigern und CO₂-Emissionen senken in der Gießerei-Industrie, November 2021. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/LEITFADEN_Systematisch_Energieeffizienz_steigern_und_CO2-Emissionen_senken_in_der_Giesserei-Industrie.pdf
- (DESTATIS 2019) DESTATIS / Statistisches Bundesamt, Produzierendes Gewerbe, Fachserie 4, Reihe 4.1.2., 14. Mai 2019. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Struktur/betriebe-taetige-personen-2040412187004.pdf?__blob=publicationFile,
- (DESTATIS 2020) DESTATIS / Statistisches Bundesamt, Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen – Input-Output-Rechnung 2015 (Revision 2019, Stand: August 2019), Fachserie 18, Reihe 2, 14. Mai 2020. https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Input-Output-Rechnung/input-output-rechnung-2180200157004.pdf?__blob=publicationFile
- (DESTATIS 2022) DESTATIS / Statistisches Bundesamt. Verkehr. Seeschifffahrt. Fachserie 8, Reihe 5, Dezember 2021. 10.03.2022. Unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Publikationen/Downloads-Schifffahrt/seeschifffahrt-monat-2080500211124.pdf> , abgerufen am 02.05.2023
- (DESTATIS 2022a) DESTATIS / Statistisches Bundesamt. Statistik. Deutschland. Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt. Empfang von Gütern, Versand von Gütern, Umgeschlagene Güter (Binnenschifffahrt): Deutschland, Jahre, Ausgewählte Binnenhäfen. Code 46321-0015. Unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=46321->

- 0015&bypass=true&levelindex=0&levelid=1683531032473, abgerufen am 08.05.2023
- (DLR 2022) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Zukünftige maritime Treibstoffe und deren mögliche Importkonzepte – Kurzstudie, Mai 2022
- (DVZ 2021) DVZ – Deutsche Verkehrszeitung. Landstrom in Binnenhäfen ist noch ein mühsames Geschäft. 05.05.2021. Unter <https://www.dvz.de/rubriken/land/binnenschifffahrt/detail/news/landstrom-in-binnenhaefen-ist-noch-ein-muehsames-geschaeft.html>, zuletzt abgerufen am 11.05.2023
- (EC 2017) EU Commission, Horizon 2020 – Work Programme 2016-2017, General Annex G. Technology readiness levels (TRL), 2017
- (HANS-BÖCKLER 2022) Küster Simic, A.; Schönfeldt, J.; Hans-Böckler-Stiftung, H₂-Transformation der Stahlindustrie und des Energieanlagenbaus – Working Paper Forschungsförderung, November 2022
- (Imdahl 2021) Potentials of Hydrogen Technologies for Sustainable Factory Systems. In: Procedia CIRP (2021), 98, S. 583-588
- (IFW 2020) Kiel Institut für Weltwirtschaft, Die Maritime Wirtschaft Schleswig-Holsteins: Strukturen und ökonomische Bedeutung, August 2020.
- (IG Metall 2022) IG Metall Küste, Schiffbaumfrage 2022 – Zusammenfassung der Ergebnisse, September 2022.
- (IRONANDSTEEL 2020) Joachim von Scheele, Linde, Embracing hydrogen Flameless Oxyfuel for CO₂-free heating, Editorial der Iron & Steel Today, 2020, Ausgabe Oktober / November.
- (Laval et al. 2020) Alfa Laval; Hafnia; Haldor Topsoe; Vestas; Siemens Gamesa Renewable Energy's: Ammonfuel – An industrial view of ammonia as a marine fuel. August 2020
- (LBST 2019) LBST, DNV GL, IfS, Strombasierte Kraftstoffe für Brennstoffzellen in der Binnenschifffahrt – Hintergrundbericht, Studie im Auftrag der NOW GmbH für das BMVI, September 2019
- (Maersk Mc-Kinney 2022) Maersk Mc-Kinney Moller Center for Zero Carbon Shipping, Maritime Decarbonization Strategy 2022 – A decade of change, 2022 <https://cms.zerocarbonshipping.com/media/uploads/publications/Maritime-Decarbonization-Strategy-2022.pdf>
- (Metzner 2021) Metzner, T. / bremenports GmbH & Co. KG. SHARC: Smartes Hafens-Applikationskonzept zur Integration erneuerbarer Energien. Zwischenstand zur Diskussion. 11.03.2021. Unter https://greenshipping-niedersachsen.de/wp-content/uploads/2021/05/210527_GreenPorts_PPTs.zip, abgerufen am 04.05.2023
- (Meyer Werft 2016) MEYER WERFT GmbH & Co. KG, Gesellschaftliche Verantwortung, 2016
- (MRV 2021) EMSA, Thetis-MRV, 2021.

- (NOW 2013) Untiedt und Leites, e4ships – Brennstoffzellen im maritimen Einsatz, Demoprojektpräsentation 2013
- (NPorts 2023) Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG, Nachhaltigkeitsbericht 2023, 2023
- (NWR 2023) Nationaler Wasserstoffrat, Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland – Grundlagenpapier, Februar 2023,
https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2023/2023-02-01_NWR_Grundlagenpapier_H2-Bedarf_2.pdf
- (POK 2021) Seehafen Kiel GmbH & Co. KG, Blue Port Umweltbericht, 2021
- (Ragwitz 2023) Ragwitz, M. Wasserstoff-Bedarf und Transportkapazitäten in Deutschland und EU – H₂-Seminar der BMWK-Projektgruppe Wasserstoff-Infrastruktur, Juni 2023
- (Ramboll 2022) Ramboll Deutschland GmbH, Studie Alternative Antriebe für Hafenumschlaggeräte - Abschlussbericht, Dezember 2022
- (Ramboll 2022b) Ramboll Deutschland GmbH, Kraftstoffanalyse in der Schifffahrt nach Segmenten – Abschlussbericht, Juni 2022
- (RP 2020) ROSTOCK PORT GmbH, Nachhaltigkeitsbericht, Dezember 2020
- (Statistikamt Nord 2015) Vorwig, W.; Wiemann, U.; Kobbe, W.; Gabka, D. / Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein. Seeschifffahrt und Häfen in Norddeutschland. Januar 2015.
- (TKMS 2023) Thyssenkrupp Marine Systems GmbH, Sustainability Brochure, 2023.
- (Umlaut 2021) umlaut energy GmbH, EMCEL GmbH, Becker Büttner Held Rechtsanwälte, Forschungszentrum Jülich GmbH, H₂-Erzeugung und Märkte Schleswig-Holstein, Anhang C, Februar 2021
- (Umsicht 2021) Fraunhofer UMSICHT und Duisport, Metastudie – Binnenhäfen als Handlungsräume der Energiewende, Dezember 2021
- (Vakili 2022) Vakili, Schönborn, Ölçer. Application of the transdisciplinary shipyard energy management framework by employing a fuzzy multiple attribute group decision making technique toward a sustainable shipyard: case study for a Bangladeshi shipyard. In: Journal of Shipping and Trade (2022), 7.22.
- (Vakili 2023) Vakili, Schönborn, Ölçer. The road to zero emission shipbuilding Industry: A systematic and transdisciplinary approach to modern multi-energy shipyards. Energy Conversion and Management: X (2023), 18, 100365.
- (VDMA/VSM 2022) VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau und Verband für Schiffbau und Meerestechnik e.V., Klimaschutz braucht alternative Schiffstreibstoffe – Eine PtX-Roadmap für die maritime Energiewende, Juli 2022.
- (VDR 2023) VDR – Verband Deutscher Reeder. Landstromversorgung in Deutschland. Unter <https://www.reederverband.de/de/themen/umwelt-klimaschutz/landstromversorgung-deutschland>, abgerufen am 11.05.2023

- (VSM 2021) Verband für Schiffbau und Meerestechnik e. V, Jahresbericht 2020 | 2021, Mai 2021
- (Wintershall 2020) Wintershall DEA, Factsheet Umstellung auf Ökostrom, Oktober 2020. https://wintershalldea.com/sites/default/files/media/files/Factsheet_Mittelplate_Switch_to_green_power.pdf, abgerufen am 28.02.2023
- (WSV 2022) Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Veränderungen des Schiffsbestandes der deutschen Binnenflotte im Jahr 2021 – Zentrale Binnenschiffsbestandsdatei, 2022
- (ZDS 2021) Zentralverband der deutschen Seehafenbetriebe e.V. Seehäfen in der Energiewende: Wasserstoff, 2021



Ludwig Bolkow Systemtechnik

Ludwig-Bolkow-Systemtechnik GmbH (LBST)
Daimlerstr. 15 | 85521 Ottobrunn | Germany www.LBST.de