POTENZIALSTUDIE ZU BETANKUNGSINFRASTRUKTUREN FÜR KOHLENSTOFFARME UND ERNEUERBARE SCHIFFSKRAFTSTOFFE IN DEUTSCHLAND

Bericht

RAMBØLL Bright ideas. Sustainable change.

POTENZIALSTUDIE ZU BETANKUNGSINFRASTRUKTUREN FÜR KOHLENSTOFFARME UND ERNEUERBARE SCHIFFSKRAFTSTOFFE IN DEUTSCHLAND
BERICHT

Projektname	**Potenzialstudie zu Betankungsinfrastrukturen für kohlenstoffarme und erneuerbare Schiffskraftstoffe in Deutschland**
AutorInnen	**Thomas Rust (Ramboll)** **Bjarne Richter (Ramboll)** **Hanna Kurpiers (Ramboll)**
Auftraggeberin	**NOW GmbH** **Nationale Organisation für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie** **Fasanenstraße 5, 10623 Berlin** **www.now-gmbh.de**
Durchführung durch	**Ramboll Deutschland GmbH**
Veröffentlicht	**April 2024**

Ramboll
Kurt-Dunkelmann-Straße 2
18057 Rostock

E-Mail: rostock@ramboll.com
Web: https://de.ramboll.com

Für die Inhalte dieser Studie und deren Qualität sind ausschließlich die AutorInnen verantwortlich.

Fachbeirat aus der maritimen Branche

Sönke Diesener (Naturschutzbund Deutschland e.V.)
Sebastian Ebbing (Verband der Deutschen Reeder)
Linda Hastedt (Hamburg Port Authority AöR)
Christian Hoepfner (Unifeeder A/S)
Ralf Lüken (DS Energies Holding GmbH)
Jörg Mehldau (Center of Maritime Technologies gGmbH [CMT])
Markus Münz (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau VDMA e.V.)
Ralf Plump (Deutsches Maritimes Zentrum e.V.)
Tessa Rodewaldt (Maritime Plattform e.V.)
Oleksandr Siromakha (Mabanaft Deutschland GmbH)

Ramboll Deutschland GmbH

Jürgen-Töpfer-Straße 48
22763 Hamburg
Germany

Amtsgericht Hamburg, HRB 168273
Geschäftsführer:
Stefan Wallmann, Hannes Reuter

BNP Paribas S.A. Niederlassung Deutschland
IBAN: DE40512106004223034010
BIC: BNPADEFFXXX

INHALTE

1	**Management Summary**	**10**
2	**Einleitung**	**15**
2.1	Hintergrund und Zweck der Untersuchung	15
2.2	Vorgehensweise und Struktur	16
3	**Status quo und Technologieszenarien**	**18**
3.1	Methodik	18
3.2	Schiffsflotte mit Hafenanläufen in Deutschland	19
3.3	Bunkermengen der deutsche Häfen anlaufenden Schiffsflotte	24
3.4	Struktur des deutschen Bunkermarkts	28
	Seeschifffahrt	29
	Binnenschifffahrt	32
3.5	Kraftstoffoptionen und Technologieszenarien für die betreffende Flotte	34
	Seeschifffahrt	42
	Binnenschifffahrt	44
4	**Szenarien und Mengengerüste**	**47**
4.1	Methodik	47
4.2	Regulatorischer Rahmen	48
4.3	Bunkermengenszenarien	52
	Seeschifffahrt	54
	Binnenschifffahrt	61
5	**Bunkerkonzepte und Ausbaustufen für Bunkerstruktur**	**65**
5.1	Methodik	65
5.2	Gegenüberstellung der Bunkerkonzepte	66
5.3	Bunkerstrukturkonzeptionen und -potenziale	68
	Seeschifffahrt	68
	Binnenschifffahrt	79

5.4 Neubaupreise von Bunkerschiffen 79

6 Fazit und Handlungsleitfaden 85

Literatur 90

ABBILDUNGEN

Abbildung 1 |	Strukturelle Übersicht über die Studie	16
Abbildung 2 |	Anzahl Hafenanläufe durch Seeschiffe in deutschen Häfen nach Jahren und Schiffstypen	19
Abbildung 3 |	Gesamt-BRZ Hafenanläufe durch Seeschiffe in deutschen Häfen nach Jahren und Schiffstypen	20
Abbildung 4 |	Kumulierte Bunkertankgröße auf Basis der Hafenanläufe durch Seeschiffe in deutschen Häfen nach Jahren und Schiffstypen	21
Abbildung 5 |	Altersstruktur der Schiffe in deutschen Nordseehäfen (Auswahl) im Jahr 2020 nach Schiffstypen	22
Abbildung 6 |	Altersstruktur der Schiffe in deutschen Ostseehäfen (Auswahl) im Jahr 2020 nach Schiffstypen	23
Abbildung 7 |	Main Engine Fuel Type der deutsche Nord- und Ostseehäfen (Auswahl) anlaufenden Schiffe nach Anzahl im Jahr 2020	24
Abbildung 8 |	Bunkermengen in den deutschen Häfen durch die Hochseeschifffahrt [Mio. t]	25
Abbildung 9 |	Rohölumschlag im Hafen Hamburg	26
Abbildung 10 |	Bunkermengen der See- und Binnenhäfen (DE) durch die Küsten- und Binnenschifffahrt [Mio. t]	27
Abbildung 11 |	Schematische Darstellung gängiger Bunkerkonzepte in der See- und Binnenschifffahrt	28
Abbildung 12 |	Bunkerstandorte von Hoyer Marine	33
Abbildung 13 |	Agglomerationsgebiete Bunkerschiffe Binnenschifffahrt	34
Abbildung 14 |	Main Bunker Fuel von Seeschiffen nach Indienststellungsjahr	43
Abbildung 15 |	Methodik AP 2	48
Abbildung 16 |	IMO- und EU-Ziele zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Seeschifffahrt	49
Abbildung 17 |	Status der Entwicklung von Regularien für den Einsatz alternativer Schiffskraftstoffe in der Seeschifffahrt	50

Abbildung 18 | Mannheimer Erklärung und EU-Green-Deal-THG-Reduktionsziele Binnenschifffahrt 51

Abbildung 19 | Grundannahmen der Bunkermengenszenarien für alternative Kraftstoffe in Deutschland 53

Abbildung 20 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 1A für die Hochseeschifffahrt [TWh] 55

Abbildung 21 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 1A für die Hochseeschifffahrt [Mio. t] 55

Abbildung 22 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 1B für die Hochseeschifffahrt [TWh] 56

Abbildung 23 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 1B für die Hochseeschifffahrt [Mio. t] 57

Abbildung 24 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 2A für die Hochseeschifffahrt [TWh] 58

Abbildung 25 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 2A für die Hochseeschifffahrt [Mio. t] 58

Abbildung 26 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 2B für die Hochseeschifffahrt [TWh] 59

Abbildung 27 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 2B für die Hochseeschifffahrt [Mio. t] 59

Abbildung 28 | Hochlauf der absoluten Anteile [t] erneuerbar erzeugter Kraftstoffe (biogen, strombasiert/renewable fuels of non-biological origin) an der Gesamtnachfragemenge alternativer Kraftstoffe 2020–2050 60

Abbildung 29 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 100%-Defossilisierung für die Küsten- und Binnenschifffahrt [TWh] 63

Abbildung 30 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 100%-Defossilisierung für die Küsten- und Binnenschifffahrt [Tsd. t] 63

Abbildung 31 | Methodik AP 3 – chronologische Arbeitsschritte 1), 2), 3), Input & Ergebnisoutput 65

Abbildung 32 | Indikation zu Anwendungsgebiet und Mengenabdeckung verschiedener Bunkerkonzepte 66

Abbildung 33 | Vorgehen Ermittlung der Bunkermengen Vorgänge Nord- und Ostsee 70

Abbildung 34 | (Potenzielle) Importterminals mit Versorgungsgebieten LNG 75

Abbildung 35 | (Potenzielle) Importterminals mit Versorgungsgebieten Methanol 75

Abbildung 36 | (Potenzielle) Importterminals mit Versorgungsgebieten Ammoniak 76

Abbildung 37 | (Potenzielle) Versorgungshubs mit Versorgungsgebieten Wasserstoff 76

Abbildung 38 | Neubaupreise von LPG-, LPG-Ethylen- und Ammoniak-Gas-Carriern in Abhängigkeit von der Kapazität 80

TABELLEN

Tabelle 1 |	Übersicht über die im Bunkerlieferantenverzeichnis des BSH gelisteten Anbieter nach Standorten und Bunkerkonzepten	31
Tabelle 2 |	Referenzprojekte für die Erzeugung alternativer Kraftstoffe (Wasserstoff, LNG, Ammoniak, Methanol)	37
Tabelle 3 |	Typische stoffliche Eigenschaften herkömmlicher und alternativer Schiffskraftstoffe	39
Tabelle 4 |	Zweitaktmotoren-Produktportfolio der MAN ES inkl. möglicher Umrüstbarkeiten	40
Tabelle 5 |	Viertaktmotoren-Produktportfolio der MAN ES und von Wärtsilä inkl. möglicher Umrüstbarkeiten	41
Tabelle 6 |	Eignung alternativer Kraftstoffe nach Seeschiffssegment	44
Tabelle 7 |	Regionale Unterschiede bei der Bezeichnung und Abdeckung von Bunkerkraftstoffen in den deutschen Seehäfen	52
Tabelle 8 |	Gegenüberstellung der Bunkerkonzepte anhand typischer Eigenschaften	68
Tabelle 9 |	Größe und Zuteilung der Bunkereinheiten nach alternativen Kraftstoffen	69
Tabelle 10 |	Ermittelte Bunkermengen und -vorgänge alternativer Kraftstoffe in Nord- und Ostsee	70
Tabelle 11 |	Antizipierte durchschnittliche Anzahl Bunkervorgänge je Bunkereinheit	71
Tabelle 12 |	Anzahl der Bunkervorgänge nach Bunkereinheiten und Kraftstoffen sowie abgeleitete nötige Bunkereinheiten in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in der Nordsee	72
Tabelle 13 |	Anzahl der Bunkervorgänge nach Bunkereinheiten und Kraftstoffen sowie abgeleitete nötige Bunkereinheiten in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in der Ostsee	73
Tabelle 14 |	Kumulierte Anzahl benötigter Bunkerschiffe je Versorgungscluster (Nord- und Ostsee)	74

Tabelle 15 | Projekte & Projektplanung von Hubs für alternative Energieträger/Kraftstoffe 78

Tabelle 16 | Potenzielle Neubaupreise der Bunkerschiffe für die Kraftstoffe und Kapazitäten aus den Bunkerstrukturkonzeptionen 81

Tabelle 17 | Potenzielle Neubaupreise der Bunkerschiffe für die Kraftstoffe und Kapazitäten aus den Bunkerstrukturkonzeptionen inkl. Contingency 81

Tabelle 18 | Potenzielle Neubaukosten Bunkerflotte Nordsee [Mio. €] inkl. Contingency 82

Tabelle 19 | Potenzielle Neubaukosten Bunkerflotte Ostsee [Mio. €] inkl. Contingency 83

ABKÜRZUNGEN

AFIR	Verordnung über die Infrastruktur für alternative Kraftstoffe
AP	Arbeitspaket
ARA-Region	Geographisches Gebiet der Häfen Amsterdam, Rotterdam und Antwerpen
BRZ	Bruttoraumzahl
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
CESNI	Europäischer Ausschuss zur Ausarbeitung von Standards im Bereich der Binnenschifffahrt
CtS	Container-to-Ship
EK	Europäische Kommission
ES-TRIN	Europäischer Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe
EU	Europäische Union
EU ETS	Eu Emission Trade System
GHS	Global harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien
HFO	Heavy Fuel Oil
IGF-Code	International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels
IMO	International Maritime Organization
LBM	Liquefied Bio Methane
LNG	Liquefied Natural Gas
MDO	Marine Diesel Oil
MEGC	Multiple-Element-Gas-Container
MGO	Marine Gas Oil
PtS	Port-to-Ship
SIMOPS	Simultaneous Operations
StS	Ship-to-Ship
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer

Tkw	Tankkraftwagen
TtS	Truck-to-Ship

1 MANAGEMENT SUMMARY

Zur Erreichung der avisierten Klimaziele bis 2050 in der Schifffahrt ist eine Transformation der eingesetzten Kraftstoffe und Antriebssysteme erforderlich. Zur Ermöglichung dieser Umstellung ist die Verfügbarkeit einer leistungsfähigen und nachfragegerechten Bunkerinfrastruktur sowie -suprastruktur unabdingbar.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde analysiert, wie sich der Bunkerabsatz von kohlenstoffarmen und erneuerbaren Kraftstoffen in deutschen See- und Binnenhäfen entwickeln kann. Im Fokus standen hierbei neben den in Zukunft bereitzustellenden Bunkermengen alternativer Kraftstoffe auch die für die Abdeckung der in Deutschland möglichen Nachfrage nötige Bunkerschiffanzahl und -größe sowie eine Schätzung der aus dem Neubau dieser Schiffe entstehenden Kosten.

Im **Arbeitspaket 1** wurden der Status quo der die deutschen Seehäfen anlaufenden Schiffsflotte, die aktuellen Bunkerstrukturen, die Bunkermengen der See- und Binnenschifffahrt der letzten Jahre sowie mögliche zukünftige Kraftstoffoptionen erfasst. Es wurde festgestellt, dass die deutschen Seehäfen in den letzten Jahren nahezu konstante Anlaufzahlen aufweisen.

Die Gesamtbruttoraumzahl der die deutschen Seehäfen anlaufenden Seeschiffe und das hiermit indirekt verbundene theoretische Bunkerabsatzpotenzial nahmen seit 2000 kontinuierlich zu (Ausnahme: „Corona-Jahre"). Die Statistiken zu den tatsächlichen Bunkermengen der Seeschifffahrt in Deutschland seit 2000 zeichnen jedoch ein gegenläufiges Bild: Die Bunkermengen der Seeschifffahrt in Deutschland sind seit 2016 rückläufig.

Es werden in Deutschland bisher nahezu ausschließlich ölbasierte Kraftstoffe gebunkert. Mögliche LNG-Bunkermengen fielen in dem betrachteten Zeitraum so gering aus, dass sie in der als Datenbasis verwendeten Quelle nicht erfasst wurden. Die Binnenschifffahrt weist seit 2007 eine sehr konstante Bunkernachfrage auf. Als prägnantestes Bundesland für die Bebunkerung von Binnenschiffen (mengenmäßig) sticht Nordrhein-Westfalen besonders heraus.

Im Rahmen der Studie wurden die alternativen Kraftstoffe LNG, Methanol, Ammoniak und Wasserstoff als zukünftige Kraftstoffoptionen betrachtet. Alle alternativen Kraftstoffe weisen auch bei Verflüssigung oder Komprimierung eine geringere volumetrische Energiedichte als herkömmliche Kraftstoffe auf, was Auswirkungen auf nahezu alle Bereiche der Transportkette haben wird. So ist infolgedessen zukünftig bei gleichem oder ähnlichem Energiemengenbedarf mit einem größeren Gesamtbunkervolumen in der Schifffahrt zu rechnen. Effizienzsteigerungen, Skaleneffekte durch größere Tonnage, Landstrom etc. wirken diesem Trend entgegen.

Zudem zeigen gegenwärtige empirische Daten, dass das gegenüber herkömmlichen Kraftstoffen an Bord vorgehaltene Netto-Bunkervolumen bei den bei Umgebungstemperatur und -druck flüssigen Alternativen ein vergleichbares Niveau aufweist und bei komprimierten oder (tiefkalt) verflüssigten Gasen tendenziell geringer ist. Unter Berücksichtigung der insgesamt niedrigeren volumetrischen Energiedichte alternativer Kraftstoffe geht dieser Umstand mit einer größeren Anzahl an Bunkervorgängen bzw. höheren Bunkerfrequenz einher. Dies wird sich direkt auf die benötigten Bunkerstrukturen auswirken.

Importterminals und/oder Produktionsanlagen für alternative Kraftstoffe in Deutschland sind als zentraler Enabler für die Entwicklung eines Bunkermarkts einzustufen, da die regionale Verfügbarkeit den Logistikkostenaufwand für lange Distributionswege reduziert, Skaleneffekte durch große Lagermengen erschlossen werden können etc.

Das **Arbeitspaket 2** umfasst die Erarbeitung von Bunkermengenszenarien für die deutschen See- und Binnenhäfen. Den grundlegenden Rahmen für die entwickelten Szenarien bilden die jeweils gültigen Regularien zur Emissionsreduktion für die Schifffahrt. Hier sind insbesondere die in 2023 angepassten IMO-Regelungen und die FuelEU Maritime zu nennen. Für die Binnenschifffahrt wurden vor allem die Anforderungen an den Verkehrssektor des EU Green Deals und eine Absichtserklärung zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen der Binnenschifffahrt, die Mannheimer Erklärung, einbezogen.

Darüber hinaus wurden Annahmen zur Verkehrsmengenentwicklung, Effizienzsteigerungen, Alter und Struktur der die deutschen Häfen anlaufenden Flotte bzw. Schiffssegmente, regulatorische Rahmenbedingungen und Produktionspfade von alternativen Kraftstoffen etc. berücksichtigt.

Sowohl bei einer konstanten Bunkermengennachfrage als auch für eine gesteigerte Nachfrage bei moderater und vollständiger Defossilisierung ist ein deutlich steigender Bedarf an Methanol und LNG sowie nach 2030 auch an Ammoniak für die Seeschifffahrt, gemessen an der insgesamt benötigten Energiemenge, zu erwarten. Wasserstoff spielt über alle Szenarien hinweg eine eher untergeordnete Rolle. Bei vollständiger Defossilisierung bestehen in den Szenarien im Jahr 2050 mehr als 90 % der Bunkermengen aus LNG, Methanol, Ammoniak und Wasserstoff. Für die weiteren Arbeitsschritte der Studie wurde das Szenario 2B (deutlicher Anstieg der Bunkermengen in Deutschland & vollständige Defossilisierung) zugrunde gelegt. Dieses weist im Ergebnis etwa eine Verdopplung der kumulierten energetischen Bunkermenge und eine Vervierfachung der kumulierten Nettobunkermenge in Tonnen bis 2050 aus.

In der Binnenschifffahrt können kurzfristig vor allem (L-/C-)NG und mittel- bis langfristig vor allem Methanol eine wichtige Rolle spielen. Ammoniak und Wasserstoff werden nach 2030 einen geringen Markthochlauf erleben. Insbesondere die derzeitigen Sicherheitsanforderungen für den Einsatz von Ammoniak stehen einer dynamischeren Marktpenetration durch diesen Kraftstoff entgegen.

Arbeitspaket 3 überführt die auf Basis der Szenarienannahmen kalkulierten Bunkermengen in die entlang der deutschen Küstenlinie zukünftig benötigten Bunkervorgänge. Darauf aufbauend werden die dafür bereitzustellenden Bunkerschiffe, unterschieden nach maximalem Tankvolumen (für Bunkergut) und Kraftstoff, ermittelt. Dies sind 13 kleine, 5 große und 4 sehr große Bunkerschiffe für die Nordsee im Jahr 2050. Für die Ostsee sind es 22 kleine, 2 mittlere und 3 große Bunkerschiffe. Der benötigte Bestand an Bunkerschiffen ist in mehreren Ausbaustufen über den gesamten betrachteten Zeitraum hinweg (bis 2050) aufzubauen. Die Bunkerschiffe sind das zentrale Distributionsmittel von den entstehenden (Import-)Terminals für die alternativen Energieträger. Gleichzeitig versorgen große Bunkereinheiten mit entsprechendem Einsatzgebiet kleinere Bunkereinheiten mit regionalem Fokus an Standorten ohne Import- und Distributionsinfrastruktur.

Eine Kostenschätzung, basierend auf indikativen Neubaupreisen von Tankschiffen, zeigt für den Neubau dieser Schiffe ein Investitionsvolumen von insgesamt ungefähr 1,74 Mrd. € auf. Die Berechnung basiert im Wesentlichen auf Neubaupreisen der letzten Jahre für auf asiatischen Werften gebaute Tankschiffe und Bunkereinheiten zuzüglich einer festen Contingency zur intrikaten Abbildung von Materialpreissprüngen der jüngeren Vergangenheit und der Ausstattung als Bunkerschiff. Ein Aufpreis für einen Neubau in Europa und die Ausstattung als Bunkerschiff sind nicht explizit berücksichtigt.

Die zusätzlich benötigte Menge an Bunkergut für die Binnenschifffahrt wird mit langfristig etwa 100.000 t jährlich taxiert. Die Mengensteigerung hängt stark von dem tatsächlichen Mix der

Bunkerkraftstoffe im Binnenschifffahrtsbereich ab. Für Anwendungen von Wasserstoff und Ammoniak sowie für den Einsatz von (L-/C-)NG sind neue Bunkerstrukturen zu etablieren. Vor allem für Methanol sind Erweiterungen und Umwidmungen bestehender Anlagen für etablierte Kraftstoffe denkbar. Eine Metadatenanalyse der Standorte aktueller Bunkerstrukturen der Binnenschifffahrt lässt darauf schließen, dass sich ein Großteil der Bunkerstrukturen für die Binnenschifffahrt in oder in der Nähe von Seehäfen mit Binnenwasserstraßenzugang befindet. Ein speziell der Binnenschifffahrt gewidmetes nötiges Investitionsvolumen lässt sich dementsprechend nicht abgrenzen.

Zusammenfassend wurden aus den einzelnen Arbeitspaketen und den übergreifenden Ergebnissen die folgenden zentralen Handlungsempfehlungen (Auswahl) abgeleitet (**Arbeitspaket 4**):

Infrastruktur

1. **Erkenntnis:** Die Bereitstellung von alternativen Energieträgern für den Bunkermarkt in den deutschen Seehäfen sowie im Binnenwasserstraßennetz ist ein Servicemerkmal für einen Standort, um das weitere Dienstleistungsangebote formuliert werden können und das für den Hafenstandort weitere Schiffsverkehre attraktivieren kann.

   Empfehlung: Es ist die zeitgerechte und verlässliche Bereitstellung von Bunkerschiffen je alternativen Energieträger in der szenarioabhängigen Anzahl zu gewährleisten, um die entsprechenden Mengenpotenziale in der Versorgung der Schifffahrt erschließen zu können.

2. **Erkenntnis:** Eine sich entsprechend dem Szenario 2B entwickelnde Veränderung der Bunkernachfrage und Verschiebung des Kraftstoffmixes hin zu emissionsneutralen Kraftstoffen erfordert den zeitgerechten und ambitionierten Aufbau einer angepassten Bunkerflotte.

   Empfehlung: Hinsichtlich des Beschaffungsrhythmus ist eine Langfristplanung mit Blick auf die voraussichtlichen zukünftigen Bedarfe unter Berücksichtigung der maximal benötigten Größe der Bunkereinheiten unbedingt über die gesamten Stützjahre hinweg zu beachten. Empfehlungen zur Beschaffung können im Rahmen der vorliegenden Studie zunächst nur für die betrachteten Stützjahre 2030, 2040 und 2050 getroffen werden. Es ist jedoch in den Überlegungen inkludiert und unbedingt zu empfehlen, dass die Beschaffung der nötigen Bunkerschiffe über die gesamte vorangehende Dekade erfolgt. Zudem sind für die Ausarbeitung einer erfolgreichen und zeitgerechten Beschaffungsstrategie für Neubauten Vorlaufzeiten für die Beschaffung von Bunkerschiffen mitzudenken. Im Idealfall sollte der Beschaffungszyklus 5 Jahre vorher angedacht werden. Dazu gehören die Konzeptentwicklungs- und Designphase, die Vorbereitung und Durchführung der Ausschreibungs- und Angebotsphase, die Vertragsverhandlungen sowie die Ausführungs- und Abnahmephase. Auch die ebenso mögliche Umrüstung von gegenwärtig als Tankern eingesetzten Schiffen geht mit niedrigeren monetären und zeitlichen Herausforderungen einher.

3. **Erkenntnis:** Tankschiffe für den interkontinentalen Energieträgertransport haben andere Dimensionen als Bunkerschiffe, die im Vergleich als eher klein bezeichnet werden können. Zudem weisen die verschiedenen Bunkerschiffsgrößen unterschiedliche Schiffsdimensionen auf. Hieraus ergeben sich veränderte Anforderungen an die Befüllstationen (z. B. Ladeplattformhöhe im Verhältnis zur Deckshöhe, Schiffslänge im Verhältnis zu Festmacherdalben und Fenderlinien).

   Empfehlung:
   a) Für Bunkerschiffe sind zwingend ausreichend Befüllschnittstellen und Abfertigungskapazitäten an den Import- und ggf. Distributionsterminals vorzusehen. Explizit eingeschlossen ist hierbei die Schaffung genehmigungsrechtlicher Grundlagen. Durch Importvorgänge hochgradig ausgelastete Anleger bzw. Liegeplätze sind zwingend um Anlegerkapazitäten für die Befüllung von Bunkerschiffen zu ergänzen, eine standortgenaue Umlage der hier ermittelten Gesamtbedarfe und abzubildenden Bunkerschiffsgrößen ist separat zu ermitteln. Diese Liegeplätze sollten möglichst am Ort der Lade- und Löschvorgänge sein, um ein wirtschaftlich unattraktives Verholen zu vermeiden.

   b) Die Befüllschnittstellen müssen auf die schiffsseitigen Anforderungen abgestimmt sein (z. B. Ladeplattformhöhen, Dalbenabstände, Fenderlinien). Die nachträgliche Anpassung von Gegebenheiten geht mit zusätzlichem Aufwand einher.

4. **Erkenntnis:** Eine große Anzahl von Bunkervorgängen wird ergänzend zu Bunkerschiffen durch Tank-Lkw durchgeführt.

   Empfehlung: Befüllstationen für Tank-Lkw in ausreichender Anzahl sind an den Import- und ggf. Distributionsterminals bereitzustellen.

Regulatorik

5. **Erkenntnis:** Eine Bunkerstrukturen und -vorgänge betreffende Regulatorik kann aktuell vor allem bezüglich alternativer Kraftstoffe als sehr lückenhaft und nicht harmonisiert bewertet werden. Teilweise existieren starke Unterschiede zwischen Standorten oder/und Bundesländern. Zudem sind Kommunikationswege und behördliche Zuständigkeiten sehr heterogen.

   Empfehlung: Es ist dringend erforderlich, regulatorische Rahmenbedingungen zum Bunkern alternativer Energieträger zwischen den Hafenstandorten an der deutschen Nord- und Ostseeküste zu harmonisieren, um den nötigen standortübergreifenden Einsatz der Bunkereinheiten zu erleichtern und für die Schifffahrt eine größtmögliche Flexibilität bei der Wahl des Bunkerstandortes unter gleichen Bedingungen zu gewährleisten. Möglichst ähnliche Rahmenbedingungen zur Kraftstoffübernahme zwischen den deutschen Hafenstandorten fördern die Verlässlichkeit und Flexibilität für die maritime Nachfrage.

6. **Erkenntnis:** Bis zum Jahr 2050 ist gegenüber dem heutigen Kraftstoffportfolio und den heute vornehmlich eingesetzten Tank- und Antriebstechnologien auf Schiffen mit einer deutlich höheren Diversität zu rechnen. Es ist davon auszugehen, dass sich unterschiedliche Kraftstoffe besonders für jeweils verschiedene Schiffssegmente und Schiffsgrößenklassen eignen.

   Empfehlung: Eine Priorisierung der für den jeweiligen Schiffstyp geeigneten Energieträger mit der wahrscheinlich größten Marktdurchdringung und ein darauf abgestimmter Ausbau von Bunkerstrukturen an den für den jeweiligen Schiffstyp relevanten Terminalstandorten sind zu forcieren.

   a) In jedem Hafen sollte für die am Standort voraussichtlich durch die jeweiligen Schiffssegmente nachgefragten Kraftstoffe und Bunkermengen proaktiv eine größtmögliche Anzahl von Bunkerliegeplätzen ausgewiesen werden.
   b) Diese Liegeplätze sollten möglichst am Ort der Lade- und Löschvorgänge sein, um ein wirtschaftlich unattraktives Verholen zu vermeiden.
   c) Wo möglich sollten SIMOPS-geeignete Bunkerliegeplätze ausgewiesen werden. Ausschlaggebend ist hier u. a. die Vereinbarkeit des verbunkerten Kraftstoffs mit den Umschlagaktivitäten.

7. **Erkenntnis:** Bunkerschiffe für fossile ölbasierte Kraftstoffe verfügen heute meist über einen Pool an als Warteplatz gewidmeten Liegeplätzen.

   Empfehlung: Geeignete Schiffswarteplätze in ausreichender Anzahl (an bzw. in geographischer Nähe zu den Standorten der Importterminals) sind auch für Bunkerschiffe alternativer Kraftstoffe auszuweisen bzw. zu errichten (z. B. in Tankhäfen). Ein zu weiträumiges Ausweichen der Bunkerschiffe aus ihrem Operationsbereich in Zeiträumen ohne Bunkervorgang ist zwingend zu vermeiden, um die Logistikkosten und Rüstzeiträume niedrig zu halten.

2 EINLEITUNG

2.1 Hintergrund und Zweck der Untersuchung

Die Klimakrise und die durch sie zunehmend strengere Gesetzgebung im Umweltschutz erfordern in der See- und Binnenschifffahrt nicht nur die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen, sondern auch die Einführung kohlenstoffarmer und erneuerbarer Schiffskraftstoffe. Das wichtigste legislative Organ der globalen Seeschifffahrt, die International Maritime Organization (IMO), hat seine initiale Strategie zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen (THG) aus dem Jahr 2018 zuletzt 2023 überarbeitet. Die neuen Einsparungsschritte sehen vor, die absoluten THG-Emissionen des internationalen Seeverkehrs bis 2030 um 20 % und bis 2040 um 70 % gegenüber dem Niveau von 2008 zu reduzieren. Um das Jahr 2050 soll schließlich Klimaneutralität erreicht werden **[01]**.

Flankierend wurden auch auf europäischer Ebene die Schifffahrt betreffende Gesetze zur Reduzierung der THG-Emissionen verabschiedet. Das Klimagesetz der EU strebt Netto-null-THG-Emissionen Europas bis 2050 mit anschließender Entwicklung hin zu Negativemissionen an. Die Europäische Kommission (EK) forciert die Defossilisierung der Schifffahrt im Rahmen der FuelEU Maritime Initiative. Diese fördert u. a. den Einsatz erneuerbarer, kohlenstoffarmer Kraftstoffe, um hierdurch die THG-Intensität der vom Schifffahrtssektor genutzten Kraftstoffe bis 2050 um 80 % gegenüber dem Flottendurchschnitt 2020 zu reduzieren **[02]**.

In der Binnenschifffahrt, die im Jahr 2022 rund 182 Mio. t Güter mit einer Transportleistung von 44,1 Mrd. tkm in Deutschland transportierte **[25]**, sind die Regularien der (internationalen) Hochseeschifffahrt nicht anwendbar. Die Binnenschifffahrt unterliegt jedoch EU-weiten und nationalen Regularien, Strategien und Vereinbarungen bezüglich der Emissionen des Verkehrssektors, die u. a. im Rahmen des EU Green Deals festgehalten wurden. Dieser sieht eine Reduktion der THG-Emissionen im Verkehrssektor um mindestens 50 % gegenüber dem Jahr 1990 über alle Sektoren hinweg bis zum Jahr 2030 sowie um 90 % bis zum Jahre 2050 vor.

National werden die von Deutschland avisierten Klimaziele übergeordnet im Klimaschutzgesetz festgehalten, in dem das Ziel der THG-Neutralität bis 2045 und von Negativemissionen ab 2050 verankert ist. Grundlage ist eine sektorenübergreifende Gesamtrechnung der THG. Zudem ist in dem Gesetz festgehalten, dass der Verkehrssektor seine THG bis zum Jahr 2030 um 48 % im Vergleich zum Jahr 1990 reduzieren muss.

Für eine erfolgreiche Umsetzung der beschlossenen Emissionsminderungsziele der Schifffahrt ist die Verfügbarkeit einer leistungsfähigen und nachfragegerechten Bunkerinfrastruktur und -suprastruktur für kohlenstoffarme und erneuerbare Kraftstoffe unabdingbar. Unter Berücksichtigung einer Lebensdauer bei Seeschiffen von etwa 20–25 Jahren sowie bei Binnenschiffen von 40 Jahren und mehr sind erforderliche Grundlagen frühzeitig zu definieren. Dieser Handlungsdruck spiegelt sich auch regulatorisch, z. B. in der Verordnung über die Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) des EU Green Deals, wider. Nach der AFIR-Verordnung sind die Mitgliedsstaaten dazu verpflichtet, ihren nationalen Strategierahmen zu aktualisieren, was u. a. Entwicklungspläne für den Aufbau von Lade- und Tankinfrastrukturen für erneuerbare und kohlenstoffarme Kraftstoffe beinhaltet.

Die NOW GmbH hat es sich vor diesem Hintergrund zum Ziel gesetzt, die Potenziale von Betankungsinfrastrukturen für kohlenstoffarme und erneuerbare Schiffskraftstoffe in Deutschland im Rahmen einer Studie untersuchen zu lassen. Die vorliegende Studie soll ferner

Handlungsempfehlungen für Maßnahmen und Strategien identifizieren, um die Bunkerkapazitäten für nachhaltige Schiffskraftstoffe in Deutschland auszubauen.

2.2 Vorgehensweise und Struktur

In der Studie wird das Potenzial des Aufbaus von Betankungsinfrastrukturen für kohlenstoffarme und erneuerbare Schiffskraftstoffe in Deutschland analysiert und daraus werden Handlungsempfehlungen für die Aufbau- und Entwicklungsplanung abgeleitet. Mittels vorliegender und eigens entwickelter Markt- und Technologieszenarien werden Bedarfs- und Mengengerüste für die Kraftstoffversorgung der Schifffahrt in Deutschland modelliert und Bunkerkonzepte vorgestellt sowie bewertet. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass marktplausible Szenarien, jedoch keine Prognosen erstellt wurden.

Eine Übersicht über die Studienstruktur kann Abbildung 1 entnommen werden.

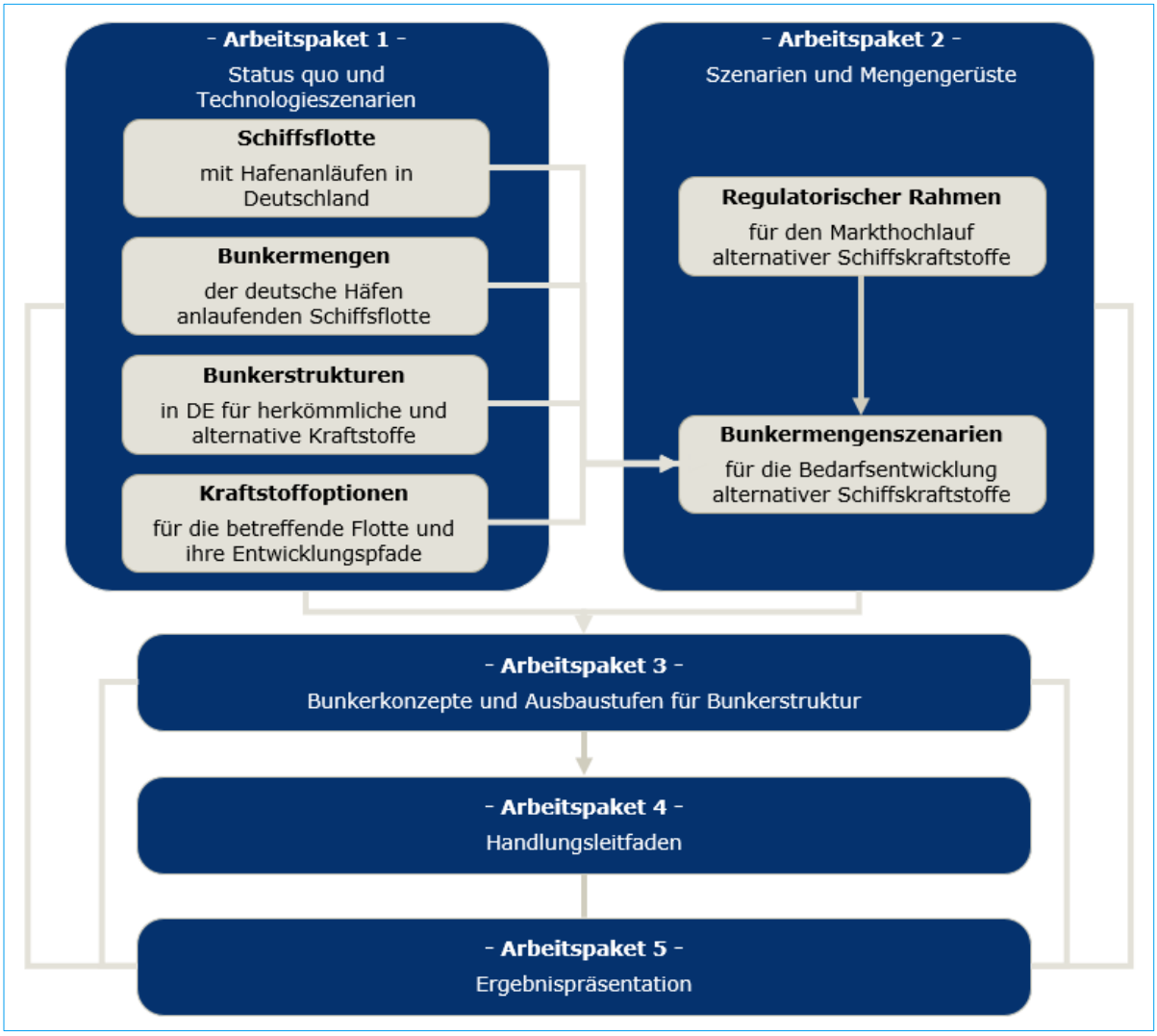


Abbildung 1 | Strukturelle Übersicht über die Studie

Die Erstellung der Studie erfolgte in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber und dem eingesetzten Fachbeirat, der sich aus Stakeholdern der maritimen Wirtschaft zusammensetzt.

Es sei eingangs darauf hingewiesen, dass es sich bei Systemen zur Betankung bzw. Bebunkerung von Schiffen in der Regel nicht um Infrastruktur (z. B. wasserbauliche Anlagen wie Anleger), sondern um Suprastruktur (= Einrichtungen, die für Transport-, Umschlag- und Lager- sowie Beschaffungs- und Verarbeitungsprozesse innerhalb einer Verkehrsanlage, wie eines Seehafens, nötig sind) **[03]** sowie bewegliche Anlagegüter (z. B. Bunkerschiffe, Tkw) handelt. Der Sprachgebrauch hinsichtlich der Zuordnung ist jedoch heterogen. So wird z. B. im Zuge der AFIR-Verordnung Bunkerequipment dem Begriff „Infrastruktur" zugeordnet. Nachfolgend werden daher alle Infrastruktur- und Suprastrukturkomponenten, die mit dem Bunkern in Verbindung stehen, als „Bunkerstrukturen" bezeichnet.

Als weitere begriffliche Einschätzung für den Sprachgebrauch in der Studie wurde folgende Vereinbarung für den Umgang mit dem Oberbegriff „Küsten- und Binnenschifffahrt" getroffen:

Unter dem Begriff „Küsten- und Binnenschifffahrt" werden Schiffe verstanden, die Personen und Güter über die Binnenwasserstraßen und -gewässer sowie im Küstenbereich transportieren. Die Grenzen zwischen der Küstenschifffahrt und Hochseeschifffahrt verlaufen fließend. Die Küstenschifffahrt transportiert Güter und Personen zwischen 2 Küstenhäfen eines Landes, aber auch international, bspw. im europäischen Raum. Die Distanzen in der Küstenschifffahrt sind ebenfalls geringer als in der Hochseeschifffahrt. Die Hochseeschifffahrt bedient den internationalen Transport von Personen und Gütern über längere Distanzen. Auf Nachfrage beim für Deutschland zuständigen Länderarbeitskreis Energiebilanzen wurde mitgeteilt, dass der Bereich Küsten- und Binnenschifffahrt nicht weiter segregiert wird. Entsprechend erfolgt die Darstellung in dieser Studie ebenfalls unter dem Oberbegriff „Küsten- und Binnenschifffahrt".

3 STATUS QUO UND TECHNOLOGIESZENARIEN

3.1 Methodik

In Arbeitspaket (AP) 1 wird die Flotte, die die deutschen See- und Binnenhäfen anläuft, quantitativ (Hafenanläufe) und qualitativ (Schiffstypen) dargestellt und das mit ihr verbundene Bunkerpotenzial dargestellt sowie der reale Bunkerbedarf aufgezeigt. Es wird eine Übersicht über die Struktur des deutschen Bunkermarkts gegeben. Zudem werden Trends bezüglich des zukünftigen Kraftstoffportfolios in der (deutschen) See- und Binnenschifffahrt identifiziert sowie technologische Entwicklungspfade und -optionen skizziert.

Schiffsflotte

Eine erste quantitative und qualitative Einordnung der die deutschen See- und Binnenhäfen anlaufenden Schiffsflotte erfolgt über Eurostat-Daten, die den Nachweis der Anzahl an Hafenanläufen in rund 100 verschiedenen deutschen See- und Binnenhäfen, unterschieden nach Schiffstonnage und Schiffstypen, erlauben. Hierdurch werden erste Hinweise auf Trends bei der Entwicklung der Hafenanläufe und Schiffsgrößen in den verschiedenen Segmenten gesammelt.

Ergänzend wurden auch Anlaufstatistiken der größten deutschen Nord- und Ostseehäfen eingeholt und unter Zuhilfenahme internationaler Schiffsdatenbanken ausgewertet. Dies erlaubt die Analyse weiterer relevanter Eigenschaften, wie z. B. des Main Bunker Fuels oder der Bunkertankgröße.

Bunkermengen

Für eine Quantifizierung des jährlichen Bunkerbedarfs wird auf an die EU übermittelte Informationen aus der Eurostat-Datenbasis sowie amtliche Statistiken zurückgegriffen. Eine anschließende Qualifizierung, mit Fokus auf regionale Schwerpunkte des Bunkerns und Trends im deutschen Bunkermarkt, erfolgt unter Einbezug des Fachbeirats sowie von Experten aus Energie- und Bunkerunternehmen, mit denen zahlreiche Gespräche geführt wurden.

Bunkerstrukturen

Ein Einblick in die aktuelle Struktur des deutschen Bunkermarkts inkl. aktiver Serviceanbieter in See- und Binnenschifffahrt, dominierender Bunkerkonzepte und eingesetzter Bunkereinheiten, -stationen und Tanklager wird ebenfalls unter Einbezug von Informationen und Erfahrungswerten des Fachbeirats und von Gesprächspartnern aus der Energie- und Bunkerwirtschaft gegeben. Öffentliche Serviceangebote, wie z. B. die Bunkerlieferantenliste **[04]** des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), werden ausgewiesen und -gewertet.

Kraftstoffoptionen

Die zukünftig infrage kommenden Kraftstoffoptionen werden unter Betrachtung von Key Critical Factors (z. B. stoffliche Eigenschaften, technologische Reife, Regulatorik) auf ihre Eignung für die in Deutschland verkehrende Schiffsflotte untersucht. Für das identifizierte Kraftstoffportfolio werden auf Basis der heute zur Verfügung stehenden Informationen Technology Readiness Level, das Erreichen der Marktreife sowie die Zeitpunkte des Markteintritts näherungsweise bestimmt. Sie dienen in den weiteren Bearbeitungsschritten als eine Grundlage für die angenommene Bedarfsentwicklung der entsprechenden Kraftstoffalternativen.

3.2 Schiffsflotte mit Hafenanläufen in Deutschland

Um das Potenzial für Bunkerstrukturen kohlenstoffarmer und erneuerbarer Schiffskraftstoffe in Deutschland bemessen zu können, soll zunächst die Nachfrageseite, d. h. die Schiffsflotte mit Hafenanläufen in Deutschland, beleuchtet werden. Hierfür wird in den folgenden Auswertungen auf Basis der Eurostat-Datenbank zunächst die Gesamtanzahl der Hafenanläufe sowie zur Einordnung der Schiffsgrößen auch die kumulierte Bruttoraumzahl der entsprechenden Anläufe behandelt. Um dabei nicht nur die Anzahl unterschiedlicher Schiffe, sondern auch die Anlauffrequenz zu berücksichtigen, werden Mehrfachanläufe mitgezählt.

In Abbildung 2 ist die Anzahl der Hafenanläufe durch Seeschiffe in den deutschen Nord- und Ostseehäfen nach Jahren und Schiffstypen dargestellt. Sie fielen seit dem Jahr 2000 nie unter 100 Tsd. Anläufe und überschritten in diesem Zeitraum in keinem Jahr 125 Tsd. Anläufe. Die Entwicklung kann dementsprechend als um ein konstantes Niveau schwankend beschrieben werden. Es lassen sich keine klaren Tendenzen zu signifikanten Ab- oder Zunahmen der Anlaufzahlen in den kommenden Jahren ableiten.

Mit Blick auf die Schiffstypen ist der gleichbleibend hohe Anteil der Stückgutfrachter an den Gesamtanläufen auffallend. Unter den Oberbegriff „Stückgutfrachter" fallen in der Eurostat-Erfassung neben herkömmlichen Stückgutschiffen auch Schwergut- und Multi-Purpose-Schiffe sowie RoRo- und kombinierte RoRo-Schiffe. Dementsprechend liegt die Dominanz dieses Segments bei den Hafenanlaufzahlen vor allem in der Einteilung und deren Detaillierungsgrad begründet und ist nicht final aufzulösen. In den deutschen Seehäfen werden trotz der vielen Anläufe durch Stückgutfrachter nicht überwiegend Stückgüter umgeschlagen. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die von Eurostat als Stückgutfrachter ausgewiesenen Schiffe neben konventionellem Stückgut u. a. Container, Projektladung und auch Schwergut und rollende Ladung (auch in Kombination mit Passagieren) befördern.

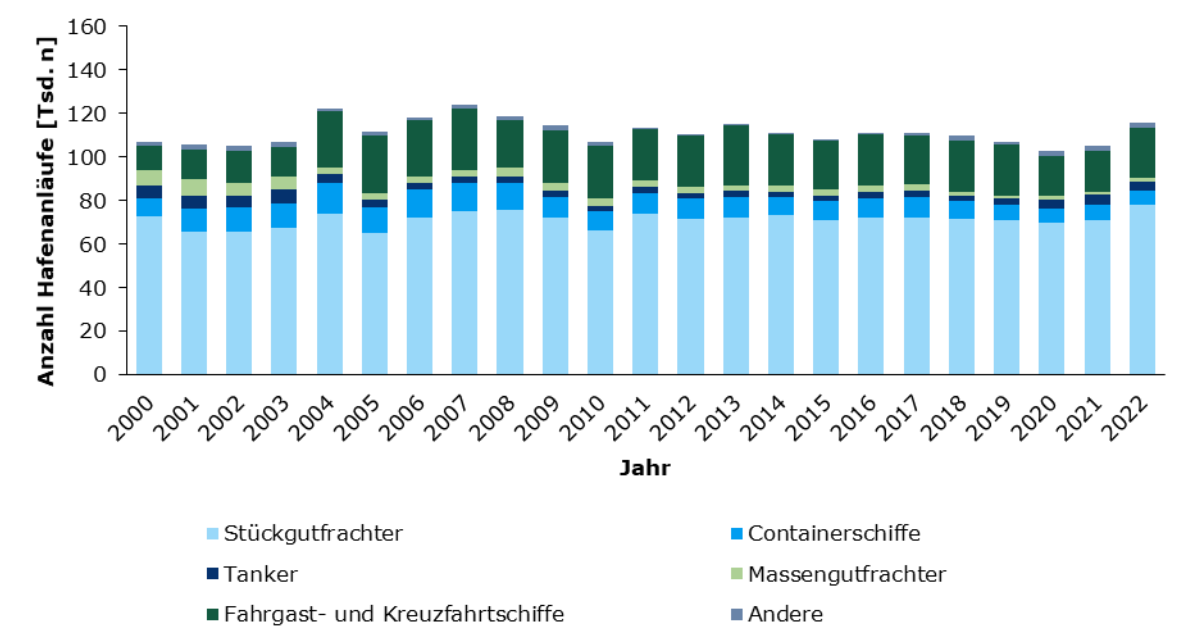


Abbildung 2 | Anzahl Hafenanläufe durch Seeschiffe in deutschen Häfen nach Jahren und Schiffstypen

In Abbildung 3 ist für den Zeitraum ab dem Jahr 2000 die kumulierte Schiffsgröße der Seeschiffe in den deutschen Nord- und Ostseehäfen anhand der Bruttoraumzahl (BRZ) sowie unterschieden nach Schiffstypen dargestellt. Neben der Frequentierung der deutschen Seehäfen ist die Größe

der abgefertigten Schiffe für die Potenziale von Bunkerstrukturen eine entscheidende Kennzahl, da mit ihrer Dimensionierung auch der Verbrauch und somit der Bunkerbedarf der Schiffe ansteigt.

Vor dem Hintergrund der relativ konstanten Anlaufzahlen (siehe Abbildung 2) verzeichnete die BRZ der Seeschiffe in den deutschen Seehäfen bis zum Jahr 2018 eine erkennbare Zunahme, die vor allem auf das Schiffsgrößenwachstum (bei gleichzeitig abnehmender Anzahl der Anläufe) der Containerschiffe zurückzuführen ist. Während die Anlaufzahlen im Zuge der Corona-Pandemie und der damit sinkenden Umschlagzahlen ab dem Jahr 2020 auf konstantem Niveau blieben, haben sich im selben Zeitraum die Gesamtbruttoraumzahlen merkbar verringert. Diese Abnahme bei den Größen der Schiffe in den deutschen Seehäfen wurde insbesondere im Bereich der Stückgutfrachter vollzogen. Insgesamt deutet die Tendenz der Schiffsgrößenentwicklung in den letzten 3 Jahren eine Rückkehr auf das Vor-Corona-Niveau an.

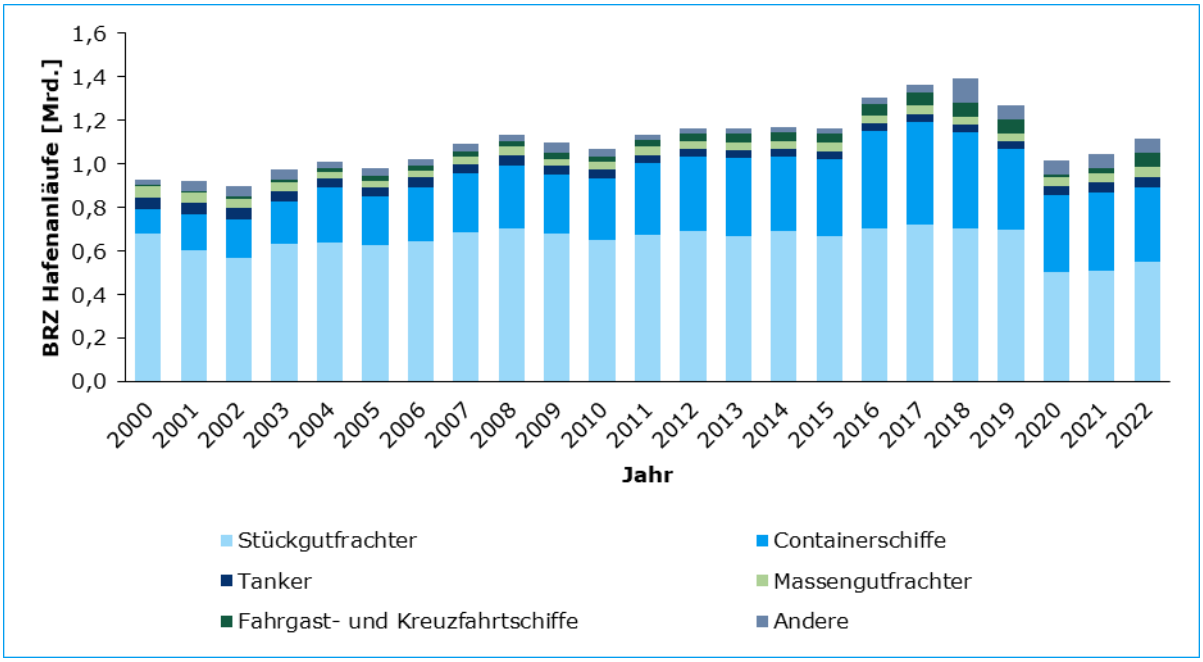


Abbildung 3 | Gesamt-BRZ Hafenanläufe durch Seeschiffe in deutschen Häfen nach Jahren und Schiffstypen

Ausgehend von der Anzahl und Größe wurde in einem nächsten Schritt getrennt nach Schiffstypen näherungsweise die Bunkertankgröße aller Seeschiffe, die deutsche Seehäfen anlaufen, ermittelt. Dafür wurden basierend auf Realdaten in den verschiedenen Segmenten Trendfunktionen erstellt, anhand derer die Bunkertankgröße in Abhängigkeit von der Bruttoraumzahl der Schiffe ermittelt werden kann.

Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Gesamtbunkertankgrößen verhalten sich entsprechend dem zuvor geschilderten Vorgehen proportional zur Entwicklung der Gesamtbruttoraumzahlen (siehe Abbildung 3). Insgesamt beträgt das theoretische Bunkermengenpotenzial für Seeschiffe in den deutschen Seehäfen somit ungefähr 100 Mio. m^3 an Kraftstoff. Die im Bunkermarkt unübliche Angabe in Kubikmetern rührt von der Volumenangabe für die Kraftstofftanks der Schiffe her. Heute werden nahezu ausschließlich herkömmliche, auf Mineralöl basierende Schiffskraftstoffe genutzt (siehe auch Kapitel 3.3), deren Dichte sich im Bereich zwischen 900 und 1.000 kg/m^3 bewegt. Bei einer angenommenen durchschnittlichen Dichte von 950 kg/m^3 beträgt das Bunkermengenpotenzial somit 95 Mio. t ölbasierten Kraftstoffs. Aufgrund der generell geringeren volumetrischen Energiedichten kohlenstoffarmer und

erneuerbarer Schiffskraftstoffe (siehe auch Kapitel 3.5) ist nicht auszuschließen, dass das zukünftige Potenzial sogar noch höher anzusetzen ist. Sollte die Seeschifffahrt zukünftig ähnliche Energiemengen wie heute beanspruchen und ihren Bedarf zunehmend durch alternative Kraftstoffe decken wollen, so wären hierzu noch größere Bunkermengen notwendig.

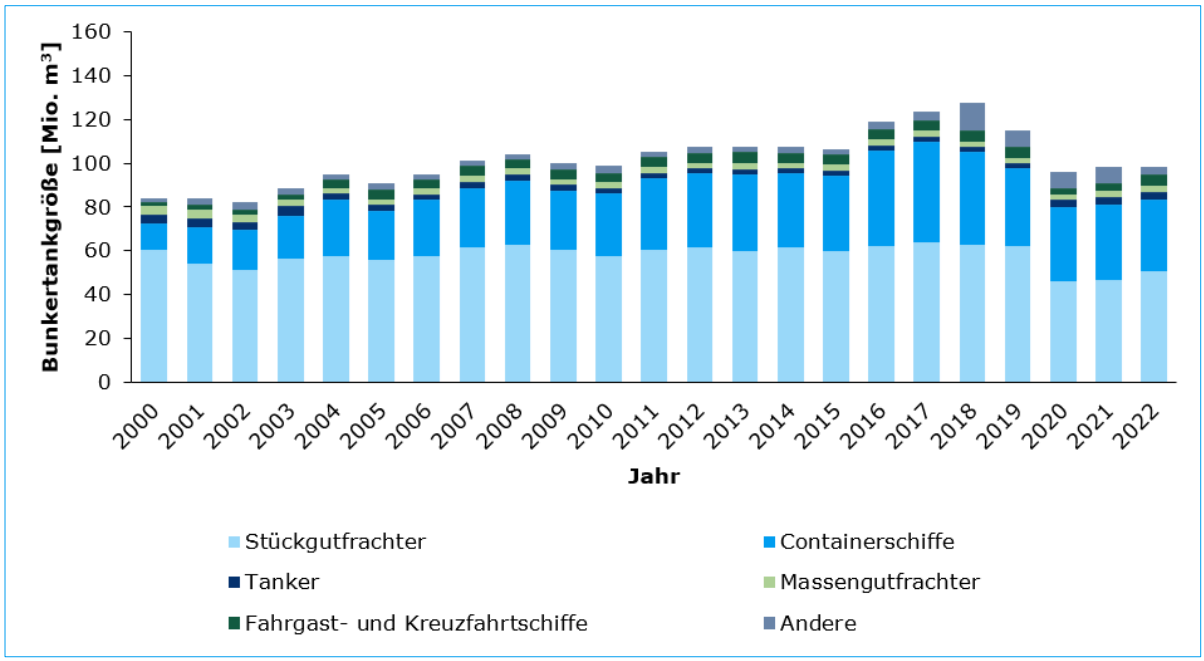


Abbildung 4 | Kumulierte Bunkertankgröße auf Basis der Hafenanläufe durch Seeschiffe in deutschen Häfen nach Jahren und Schiffstypen

Exkurs außerhalb der angewendeten Methodik: Das vorangehend beschriebene theoretische Bunkermengenpotenzial kann als Indikator für das maximal mögliche Bunkermengenpotenzial der in den deutschen Nord- und Ostseehäfen anlaufenden Seeschiffe verstanden werden. Es entspricht einer kalkulatorischen Bunkermenge, die entstehen würde, wenn jedes die deutschen Nord- und Ostseehäfen anlaufende Seeschiff bei jedem seiner Anläufe eine Bebunkerung entsprechend seiner maximalen Bunkerkapazität erhielte. Insbesondere für Schiffe, die täglich/wöchentlich mehrfach deutsche Häfen anlaufen, ist dieser Wert als deutlich zu hoch einzustufen. Grundlage der in Kapitel 4 erarbeiteten zukünftigen Bunkermengenszenarien sind Statistiken über tatsächliche Bunkermengen (siehe Kapitel 3.3).

Ergänzend zu den Eurostat-Daten wurden bei den größten deutschen Nord- und Ostseehäfen Anlaufstatistiken der zurückliegenden Jahre abgefragt. Unter den rückmeldenden Häfen befinden sich sowohl die umschlagbezogen größten Nord- (Hamburg, Bremische Häfen) als auch Ostseehäfen (Rostock), sodass die ausgewerteten Daten einen repräsentativen Überblick bieten. Die nachfolgenden Analysen wurden jeweils für das Betrachtungsjahr 2020 durchgeführt, das im weiteren Untersuchungsverlauf als Ausgangspunkt der Bunkermengenszenarien und Bunkerstrukturkonzeptionen dient. Die Anlaufstatistiken erlauben anhand der IMO-Nummern und unter Zuhilfenahme von internationalen Schiffsdatenbanken, weitere für die Potenzialstudie relevante Informationen auszuwerten, darunter:

- die Altersstruktur
- das Kraftstoffportfolio der Seeschiffe in den deutschen Nord- und Ostseehäfen

Die nachfolgenden Darstellungen beziehen nicht wie zuvor die Anzahl der Anläufe der Schiffe ein, stattdessen fließt jedes Schiff, das im Jahr 2020 einen Anlauf in einem deutschen Seehafen hatte, nur einmal in die Statistik ein.

In Abbildung 5 und Abbildung 6 ist die Altersstruktur der Seeschiffe in den deutschen Nord- und Ostseehäfen nach Clustern (5-Jahres-Intervalle) und Schiffstypen dargestellt. Sie weist zwischen den Nord- und Ostseehäfen grundsätzlich eine hohe Ähnlichkeit auf. Unterschiede bestehen vor allem beim Aufkommen von Containerschiffen, die fast ausschließlich Nordseehäfen anlaufen. Die für die Bewältigung des Transportaufkommens wichtigsten Schiffstypen, Containerschiffe, Tanker und Massengutfrachter, werden selten älter als 25. Das Altersprofil der Fahrgastschiffe und Stückgutfrachter zeigt dagegen eine breitere Streuung. Entsprechend sind für die Schiffstypen unterschiedliche Ersatzzeitpunkte bzw. Nutzungsdauern zu veranschlagen.

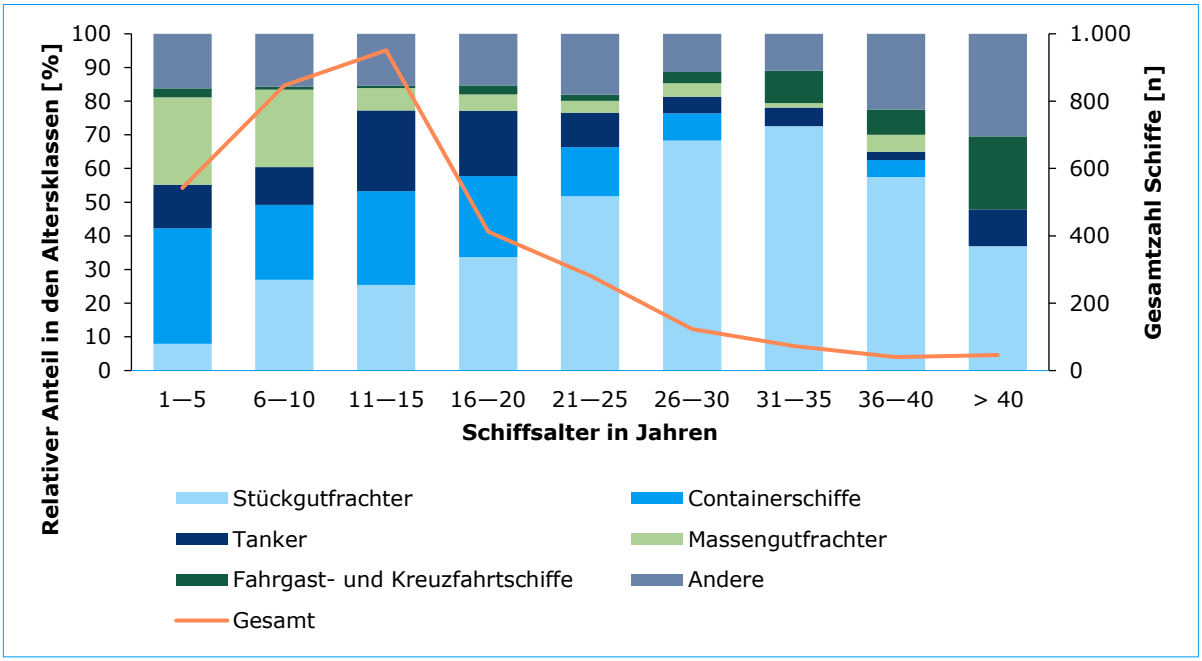


Abbildung 5 | Altersstruktur der Schiffe in deutschen Nordseehäfen (Auswahl) im Jahr 2020 nach Schiffstypen

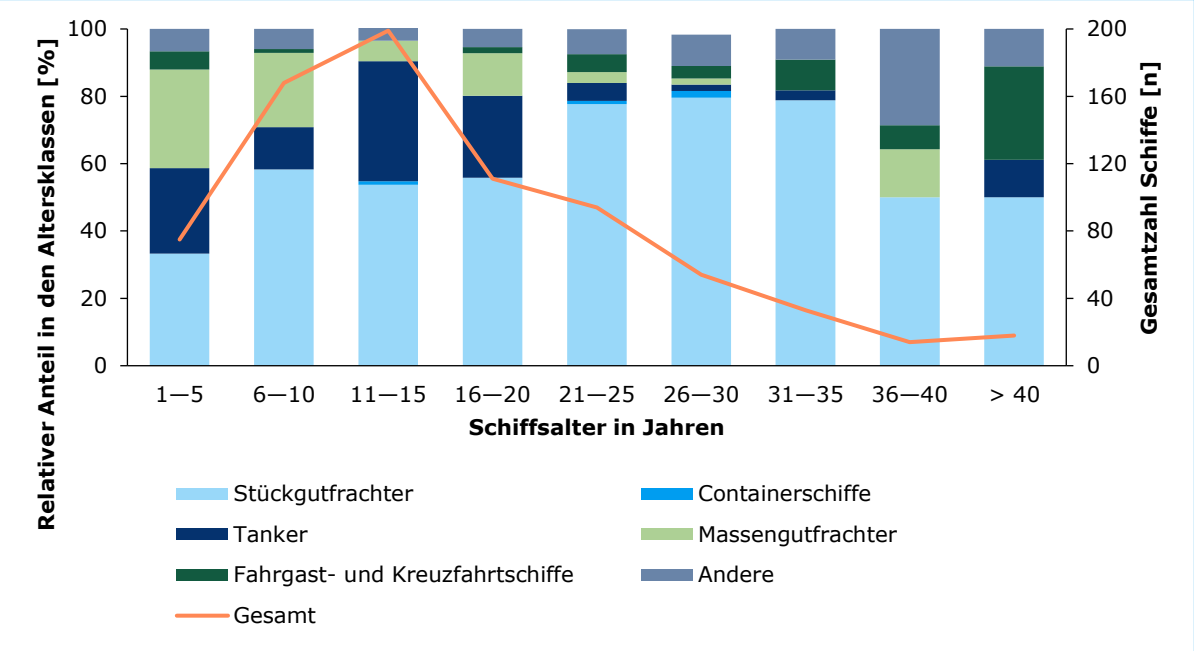


Abbildung 6 | Altersstruktur der Schiffe in deutschen Ostseehäfen (Auswahl) im Jahr 2020 nach Schiffstypen

Die ermittelten Altersstrukturen dienen als Grundlage für die Ersatzzeitpunkte/Nutzungsdauern der Schiffe in den verschiedenen Segmenten und somit als Ausgangspunkt für den Austausch der Flottenbestandteile im rollierenden System zur Ermittlung der zukünftigen Bunkermengenbedarfe in Deutschland bis 2050. Auf die genauen Annahmen wird in Kapitel 4.3 näher eingegangen.

In Abbildung 7 sind die in den Hauptmotoren der Seeschiffe in den deutschen Nord- und Ostseehäfen eingesetzten Kraftstoffe dargestellt. Die Übersicht verdeutlicht die Dominanz herkömmlicher Schiffskraftstoffe, zu denen Heavy Fuel Oil (HFO), Marine Diesel Oil (MDO) und Marine Gas Oil (MGO) inkl. Bioanteile in ihren unterschiedlichen Ausprägungen (z. B. Unterscheidung hinsichtlich des Schwefelgehalts) gezählt werden. Einziger bereits auftretender alternativer Kraftstoff war im Jahr 2020 Liquefied Natural Gas (LNG). Die LNG-Bunkermengen fielen jedoch so gering aus, dass sie in der als Datenbasis verwendeten Quelle nicht erfasst wurden. In Hinblick auf die aufzustellenden Bunkermengenszenarien (siehe Kapitel 4.3) ist festzuhalten, dass im Jahr 2020, welches das Ausgangsjahr der Betrachtung darstellt, nahezu ausschließlich ölbasierte Kraftstoffe eingesetzt wurden. Eine Tendenz zum Einsatz alternativer Kraftstoffe ist nur für LNG und in sehr geringem Maße nachweisbar. Dementsprechend sollen in Kapitel 3.5 nähere Untersuchungen zu den Kraftstoffoptionen der betreffenden Flotte angestellt werden.

Für eine Auswertung der Schiffsflotte und korrespondierender Anläufe in der Binnenschifffahrt mangelt es an einer validen Datenbasis. In der Eurostat-Datenbank werden Anläufe ausgewiesen, die aber eine unrealistisch niedrige Ausprägung aufweisen und auf eine mangelhafte Rückmeldung o. Ä. an das statistische Amt schließen lassen. Folglich müssen andere Anhaltspunkte gesammelt werden, um das Potenzial für Bunkerstrukturen kohlenstoffarmer und erneuerbarer Schiffskraftstoffe in der deutschen Binnenschifffahrt zu bemessen.

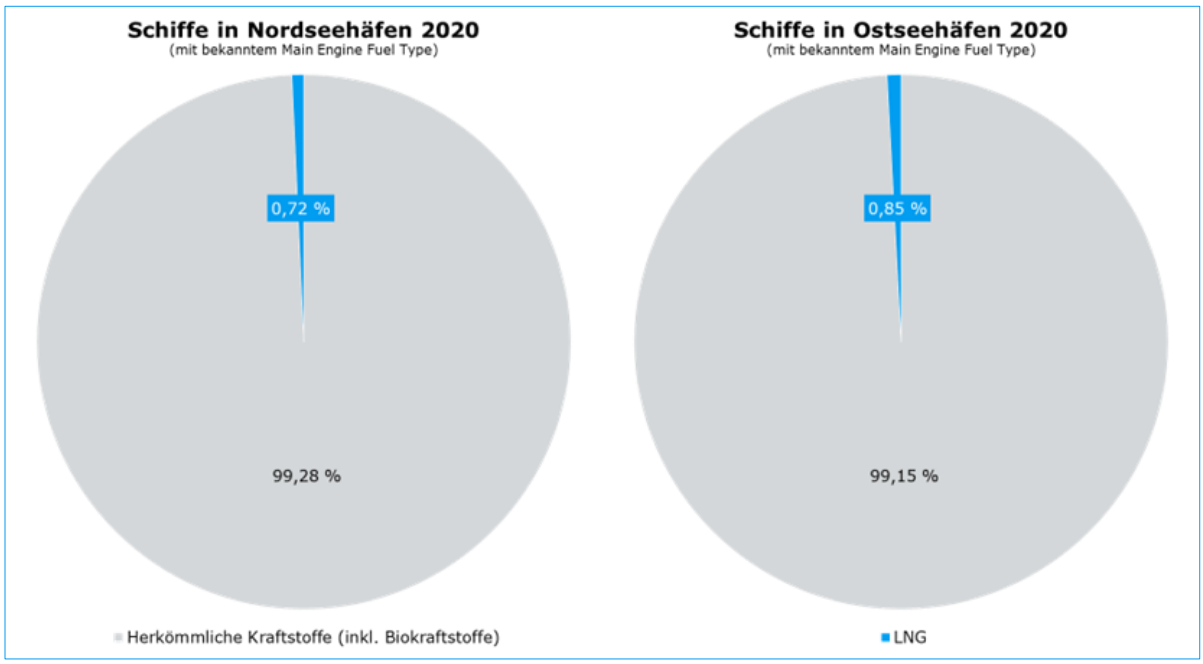


Abbildung 7 | Main Engine Fuel Type der deutsche Nord- und Ostseehäfen (Auswahl) anlaufenden Schiffe nach Anzahl im Jahr 2020

3.3 Bunkermengen der deutsche Häfen anlaufenden Schiffsflotte

Im zweiten Schritt der Darstellung des Status quo werden anschließend die Bunkermengen in den deutschen See- und Binnenhäfen zusammengetragen, die durch die zuvor vorgestellte Schiffsflotte nachgefragt werden. Die gegenwärtigen und historischen Bunkermengen dienen zum einen der Ableitung von Entwicklungen und Trends im deutschen Bunkermarkt und bilden zum anderen den Ausgangspunkt der Bunkermengenszenarien und somit der Potenziale für Bunkerstrukturen kohlenstoffarmer und erneuerbarer Schiffskraftstoffe in Deutschland bis zum Jahr 2050.

Beim Ausweisen der Bunkermengen wurde auf Informationen der Eurostat-Datenbank zugegriffen. In dieser werden Bunkermengen der Hochseeschifffahrt sowie der Küsten- und Binnenschifffahrt unterschieden.

Die Bunkermengen der Hochseeschifffahrt, dargestellt in Abbildung 8, zeigen im Bereich der Destillate MDO und MGO eine nahezu stabile Nachfrage im Zeitverlauf. Seit 2018 bewegen sie sich mengenbasiert auf dem gleichen Niveau wie HFO. Die Bunkermengen im Bereich HFO haben bis zum Jahr 2007 einen deutlichen Anstieg erfahren, gingen aber seit der Weltwirtschaftskrise kontinuierlich zurück und befinden sich seit dem Jahr 2019 stabil auf einem vergleichsweise geringen Niveau.

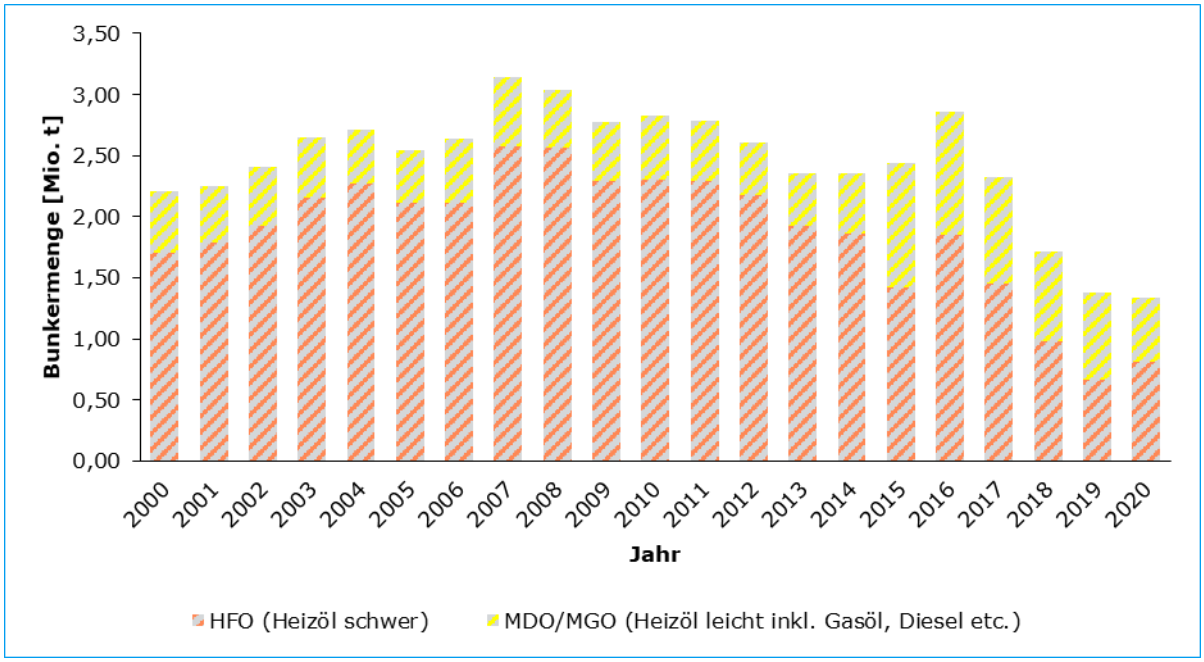


Abbildung 8 | Bunkermengen in den deutschen Häfen durch die Hochseeschifffahrt [Mio. t]

Der deutlich erkennbare Rückgang der Gesamtbunkermengen der Hochseeschifffahrt in Deutschland in den letzten Jahren ist nicht auf geringere Anlaufzahlen oder Schiffsgrößen in den deutschen Seehäfen zurückzuführen, wie die Betrachtungen zur Schiffsflotte zeigen (siehe auch Kapitel 3.2). Eine Mitverantwortung trägt stattdessen u. a. der Rückgang der inländisch importierten bzw. verarbeiteten Rohölmengen. Insbesondere ist hier der Rückgang der Importmengen von Rohöl seit 2013 im Hamburger Hafen (siehe Abbildung 9) aufgrund der schrittweisen Übernahme der ehemalige Shell-Raffinerie durch das schwedische Mineralölunternehmen Nynas zu nennen. Es erfolgte eine Umrüstung der Anlagen von der Kraftstoffproduktion auf Spezialöle bzw. -schmierstoffe ab dem Jahr 2014. Aus dem Wegfall von Import- und Verarbeitungskapazitäten für Kraftstoffe resultierte ein Rückgang der Bunkermengen und entsprechender Bunkervorgänge. Diese Entwicklung spiegelt sich zudem deutlich in den gesamtdeutschen Bunkermengen (Abbildung 8) wider. Der entgegen dem Trend zu verortende leichte Anstieg der Gesamtbunkermenge im Jahr 2016 kann ggf. auf einen günstigen Abverkauf der Restbestände in den Rohöllagern von Nynas zurückzuführen sein, um diese anschließend umzuwidmen.

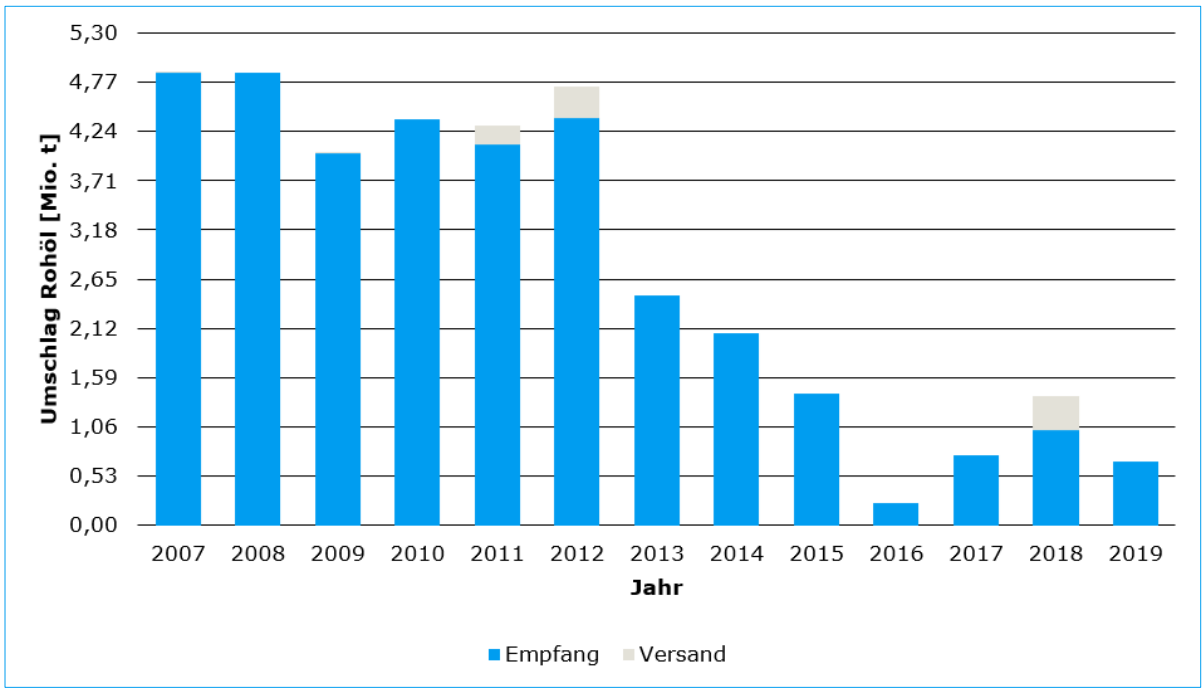


Abbildung 9 | Rohölumschlag im Hafen Hamburg

Da als Folge dieser Schließung Hamburg kein Raffineriestandort mehr ist, sind die örtlichen Kosten für Bunkerkraftstoffe aufgrund der nun erforderlichen aufwendigeren Beschaffung angestiegen. Die Preisdifferenz des Standorts Hamburg gegenüber den ARA-Häfen hat sich daher zu Ungunsten von Hamburg entwickelt. Dies betrifft gleichermaßen Abnehmer von kleinen sowie großen Bunkermengen.

Des Weiteren werden in Hamburg aktuell kaum große Einzelbunkermengen abgerufen, da es ein Spannungsfeld zwischen der maximal möglichen Zuladung und der Menge an mitgeführter Bunkermenge gibt, die sich auf den Tiefgang auswirkt. Diese Einschränkung tangiert insbesondere potenzielle Abnehmer großer Bunkermengen.

Ebenso ist ein Einfluss auf die in Deutschland zu verortenden Bunkermengen von HFO durch die Ausweisung von Nord- und Ostsee als besondere Schwefel-Emissions-Überwachungsgebiete (SECA) denkbar. Seit dem 01.01.2015 ist in diesen Gebieten nur noch der Einsatz von Kraftstoffen mit einem Schwefelgehalt von 0,1 % m/m zulässig. Alternativ kann die Erfüllung der Richtlinie auch durch den Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen erfüllt werden, die die Einhaltung der Emissionsgrenzen sicherstellen **[31]**.

Insgesamt wird bereits aus der Bunkermengenentwicklung und den dazugehörigen Kausalitäten deutlich, dass der Bunkermarkt für die Hochseeschifffahrt in Deutschland in großer Konkurrenz zu den europäischen Nachbarländern, insbesondere den Niederlanden mit Rotterdam als Bunkerhub, steht.

Die Entwicklung der durch die Küsten- und Binnenschifffahrt in Deutschland nachgefragten Bunkermengen kann in Abbildung 10 nachvollzogen werden. Bei den eingesetzten Kraftstoffen handelt es sich in der Küsten- und Binnenschifffahrt nahezu ausschließlich um Dieselkraftstoff und leichte Heizöle. Eine Unterscheidung wurde in der Darstellung daher nicht zwischen den verbunkerten Kraftstoffen, sondern den Bundesländern vorgenommen, in denen die entsprechenden Bunkermengen anfielen. Datenbasis für die Bunkermengen der Küsten- und

Binnenschifffahrt sind Statistiken des Länderarbeitskreises Energiebilanzen zum Primärenergieverbrauch.

Die Bunkernachfrage in der Küsten- und Binnenschifffahrt bewegt sich seit der Weltfinanzkrise in den Jahren 2007 und 2008 auf einem sehr konstanten Niveau zwischen 250 und 300 Tsd. t pro Jahr. Ebenfalls eine hohe Konstanz weist der Anteil der Bunkermengen in den verschiedenen deutschen Bundesländern auf. Im dargestellten Zeitraum wurden die größten Bunkermengen in der Regel in Nordrhein-Westfalen, Hamburg, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Bremen abgesetzt. Nordrhein-Westfalen und Hamburg sind mit Abstand die Bundesländer mit dem höchsten Bunkerabsatz. Auf sie entfiel seit dem Jahr 2009 fast die Hälfte der insgesamt in der deutschen Küsten- und Binnenschifffahrt verbunkerten Kraftstoffe. Es ist davon auszugehen, dass ein großer Teil der verorteten Bunkernachfrage in den Bundesländern, die über eine Küstenlinie verfügen, auf die Küstenschifffahrt und nicht auf die explizite Binnenschifffahrt zurückzuführen ist. Nordrhein-Westfalen als reines Binnenbundesland mit dem Rhein-Ruhr-Gebiet ist demzufolge die markanteste Bunkerregion für die Binnenschifffahrt.

Insgesamt deutet die sehr konstante Bunkermengenentwicklung in der deutschen Küsten- und Binnenschifffahrt auf einen etablierten und ausgeprägten Markt sowohl auf der Angebots- als auch der Nachfrageseite hin.

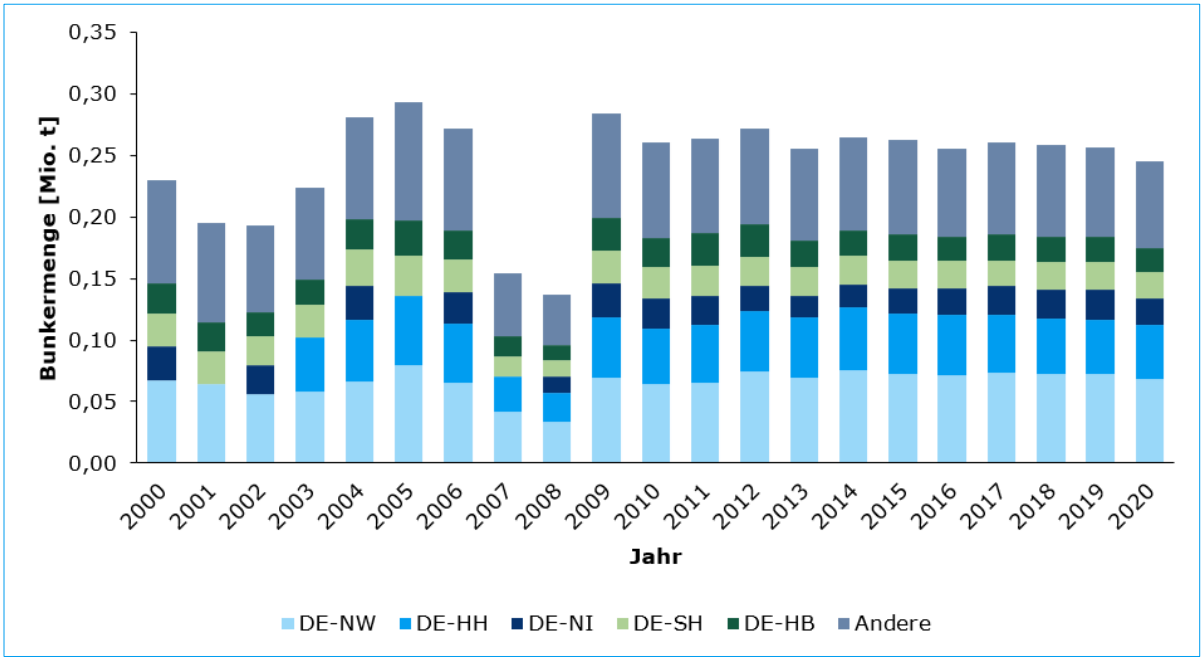


Abbildung 10 | Bunkermengen der See- und Binnenhäfen (DE) durch die Küsten- und Binnenschifffahrt [Mio. t]

3.4 Struktur des deutschen Bunkermarkts

Nachfolgend wird die gegenwärtige Struktur des deutschen Bunkermarkts – getrennt nach See- und Binnenschifffahrt – untersucht. Da es abseits der in Kapitel 3.3 ausgewerteten Datenlage zu den Bunkermengen im deutschen Bunkermarkt wenige gebündelte Marktinformationen und -statistiken mit Bezug zu Bunkerkonzepten, -strukturen etc. gibt, stützen sich die nachfolgenden Informationen auf die Erkenntnisse aus Expertengesprächen und Auswertungen, die von verschiedenen Nord- und Ostseehäfen im Zuge der Bunker- und Hafenanlaufstatistiken (siehe auch Kapitel 3.2) zur Verfügung gestellt wurden. Ziel ist es, die Infra- und Suprastrukturen, etablierte Konzepte, regionale Schwerpunkte sowie Trends im deutschen Bunkermarkt zu zeigen und damit Ansatzpunkte für zukünftige Entwicklungskonzepte zu sammeln.

In Abbildung 11 sind heute bekannte Bunkerkonzepte dargestellt. Dabei handelt es sich um:

- Ship-to-Ship (StS)
- Truck-to-Ship (TtS)
- Port-to-Ship (PtS)
- (ISO) Container-to-Ship (CtS)

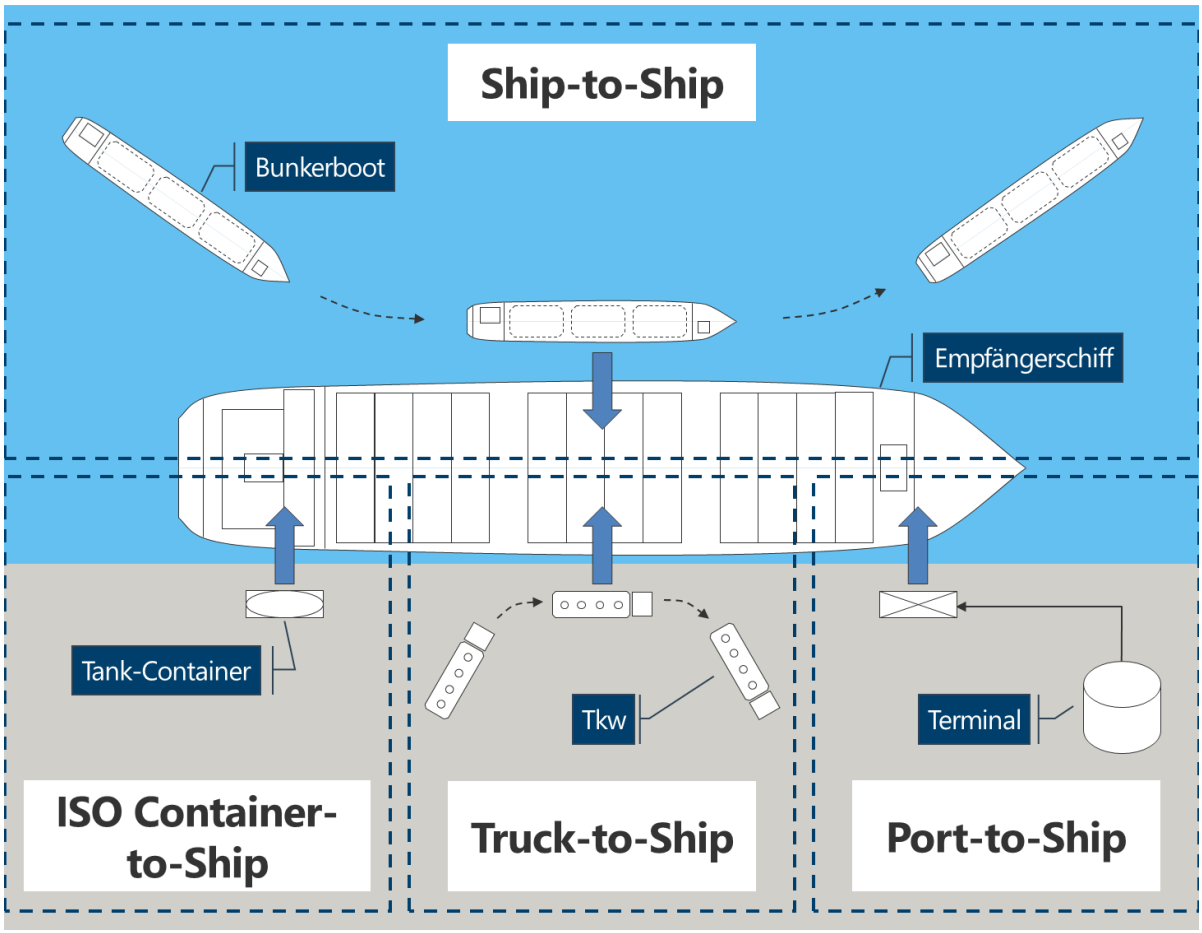


Abbildung 11 | Schematische Darstellung gängiger Bunkerkonzepte in der See- und Binnenschifffahrt

StS bezeichnet einen Kraftstofftransfer aus einem Bunkerschiff über eine Schlauchverbindung zum Empfängerschiff. Dieses Bunkerverfahren ist gut für große Mengen und Simultaneous Operations (SIMOPS), wie z. B. den gleichzeitigen Ladungsumschlag, geeignet. Unter TtS versteht man den Kraftstofftransfer aus Tank-Trailern (auch mit mehreren Trailern im Multi-Truck-Verfahren über

ein entsprechendes Verbindungsstück möglich). Dieses ist für geringere Bunkermengen geeignet und limitiert die Möglichkeit von SIMOPS. PtS ist der Kraftstofftransfer aus einem Tank über eine ortsfeste Rohr- oder Schlauchverbindung. Auch hier sind große Bunkermengen und Transferraten möglich. Dieses Verfahren lässt durch seinen ortsfesten Charakter allerdings wenig Raum für SIMOPS. Ein bisher wenig verbreitetes Verfahren ist CtS. Hierbei handelt es sich um den Umschlag von Tank-Containern oder Multiple-Element-Gas-Containern (MEGC) und ihren Anschluss an das Antriebssystem an Bord.

Das StS-Verfahren ist der wichtigste Anwendungsfall in der Seeschifffahrt und insbesondere bei großen Bunkermengen und Schiffsgrößen die gängige Praxis. In der Binnenschifffahrt zeigt sich ein heterogeneres Anwendungsbild. Nähere Betrachtungen zu den Bunkermärkten in der See- und Binnenschifffahrt folgen in den anschließenden Unterkapiteln.

Seeschifffahrt

Zum Ausweis des Bunkerangebots in der Seeschifffahrt wird vom BSH ein Verzeichnis der Lieferanten von ölhaltigem Brennstoff bzw. Schiffskraftstoff geführt **[04]**. Es liefert Kontaktdaten der entsprechenden Bunkerserviceanbieter und erlaubt eine Filterung nach Region, Hafen, Bunkerkonzept und Kraftstoff. Die Inhalte des Verzeichnisses sind unterschieden nach Bunkeranbieter, -standort und -konzept dargestellt. Die in der Liste aufgeführten Kraftstoffe umfassen nahezu ausschließlich das Spektrum der Schweröle und Destillate und sind u. a. entsprechend ihrem Schwefelgehalt ausgewiesen.

Für das Geschäft mit herkömmlichen Schiffskraftstoffen sind die größten deutschen Bunkerstandorte in der Seeschifffahrt Hamburg und die Bremischen Häfen in der Nordsee sowie Rostock in der Ostsee.

Tabelle 1 kann entnommen werden, dass die häufigsten Bunkerkonzepte und daher auch wahrscheinlich die am meisten nachgefragten in den Seehäfen die Ship-to-Ship- und Truck-to-Ship-Bebunkerung sind. Der Tabelle, die auf den Daten des BSH beruht, kann keine Aussage über die Anzahl an vorhandenen Bunkereinheiten entnommen werden. Grund hierfür ist, dass nicht qualifiziert wird, welche Bunkereinheit mehrere Abnahmestandorte bedient.

Wie auch anhand der Entwicklung der Bunkermengen (siehe Kapitel 3.3) zu erkennen ist, weisen die deutschen Seehäfen heute strategische Nachteile im Wettbewerb mit der ARA-Region (Antwerpen–Rotterdam–Amsterdam) auf, u. a. bedingt durch die Größe der Häfen und die damit korrespondierenden Schiffsgrößen. Historisch gewachsen ist das Bunkern als ursprüngliches Nischengeschäft namhafter Raffinerien. Von der positiven Entwicklung der Häfen in der ARA-Region profitierte auch der Bunkermarkt, heute ist der Hafen von Rotterdam mengenmäßig der größte Bunkerhub in Europa. In den Niederlanden versucht man aufbauend auf den gewachsenen Strukturen des heutigen Bunkermarkts Synergien für die zukünftige Ausrichtung zu schaffen und hat u. a. bereits frühzeitig das Bunkern von Methanol erprobt **[06]** sowie die Entwicklung von Importterminals für Wasserstoffträger, wie z. B. Ammoniak, auf den Weg gebracht **[07]**. Bunkerangebote für alternative Energieträger in den EU-Nachbarstaaten sind als Wettbewerber potenzieller Bunkerstrukturen in Deutschland zu verstehen.

Hinsichtlich des Portfolios alternativer Schiffskraftstoffe im deutschen Bunkermarkt ist auf die im BSH-Verzeichnis aufgeführten LNG-Bunkerlieferanten zu verweisen. Weitere alternative Angebote, wie z. B. die Bereitstellung von Methanol im TtS-Verfahren, die im deutschen Markt bereits vereinzelt umgesetzt werden, sind bislang nicht im Bunkerverzeichnis gelistet.

Der Bunkermarkt für LNG kann jedoch als repräsentatives Beispiel für das Aufkommen alternativer Kraftstoffe in der Seeschifffahrt herangezogen werden. Nachfrageseitig ist ein Anstieg aufgrund der zunehmenden Zahl LNG-betriebener (See-)Schiffe zu verzeichnen. Auf der Angebotsseite entsteht der LNG-Bunkermarkt vor allem an den Orten, an denen bereits die entsprechenden (Terminal-)Supra- und -Infrastrukturen für den Import und die Lagerung vorhanden sind (z. B. in Rotterdam oder Wilhelmshaven), da die Kosten für eine dem Import nachfolgende Distribution des Kraftstoffs als maßgeblicher Kostentreiber zu bewerten sind und entsprechend klein gehalten/vermieden werden.

Der Absatz von LNG als Kraftstoff für Seeschiffe in Deutschland hat im Zuge des Ukraine-Kriegs einen Rückschlag erlitten. Mit den steigenden Gaspreisen sind viele Reeder mit Dual-Fuel-Maschinen auf ölbasierte Kraftstoffe umgestiegen. Am Markt existiert zwar eine gewisse Akzeptanz für höhere Preise, diese wurde aber durch die Aufschläge zu Beginn des Kriegs deutlich überstrapaziert. Als Folge war die Nachfrage in der gesamten Schifffahrt in Europa nahezu nicht mehr vorhanden. Die Volatilität am Gasmarkt verdeutlicht die ökonomische Unsicherheit, die auch zukünftig mit der Nutzung alternativer Kraftstoffe in der Schifffahrt verbunden sein wird, wenngleich nicht alle Alternativen ähnlich stark an den Gaspreis gekoppelt sind wie LNG (siehe auch Kapitel 3.5).

Ein weiterer Lerneffekt aus der aktuellen Struktur des Bunkermarkts für LNG, der sich auch auf die Potenziale für den Aufbau von Infra- und Suprastruktur alternativer Schiffskraftstoffe der Zukunft übertragen lässt, ist die Bedeutung von Importterminals für die Entstehung eines wettbewerbsfähigen Bunkergeschäfts. Es ist zu verstehen, dass bei einer Bündelung des Bezugs eines Energieträgers in Form eines Importterminals jedes weitere Glied in der Logistikkette (bspw. ein nachgeschaltetes Bunkerterminal o. Ä.) den Preis für den Abnehmer erhöht und somit die Wettbewerbsfähigkeit verringert. Um in Deutschland einen relevanten Bunkermarkt für alternative Schiffskraftstoffe aufzubauen, ist es demnach nicht zielführend, die Produkte ausschließlich aus Importterminals in europäischen Nachbarländern zu beziehen, die wiederum aus den Gestehungsmärkten der Produkte bedient werden. Somit sind in den (teils bereits in Planung befindlichen) Entwicklungen von Importterminals für alternative Energieträger in Deutschland zwingend auch Nachfragen aus der See- und Binnenschifffahrt zu berücksichtigen.

Neben LNG gibt es auch bereits Angebote für Methanol am deutschen Bunkermarkt, dieses wird regulatorisch bislang allerdings noch nicht behandelt wie etablierte Schiffskraftstoffe. Es ist u. a. voll besteuert. Für Methanol gibt es bislang nur vereinzelte Anfragen. Eine Entwicklung als maritimer Kraftstoff wird im Projekt MariSynFuel gefördert **[08]**, das in direktem Zusammenhang mit der Methanol-Versorgung des Forschungsschiffs „Uthörn" (IMO-Nr.: 9920710) steht. Bestehende Bunker- und Tankschiffe lassen sich grundsätzlich sehr leicht auf Methanol umrüsten, bislang wird der Kraftstoff in Deutschland aber nur aus dem Tankwagen verbunkert.

Bei deutschen Bunkeranbietern ist die Ausrichtung auf zukünftige Energieträger in vollem Gange. Es ist unstrittig, dass es in Zukunft bedingt durch die geringeren volumetrischen Energiedichten (siehe Kapitel 3.5) der Kraftstoffalternativen mehr Bunkervorgänge geben wird. Die Kapazitäten (Bunkereinheiten, Tanklager etc.) im deutschen Bunkermarkt werden operativ-strategisch auf die zukünftigen Anforderungen ausgerichtet. Zwischen Bunkeranbietern und Hafenbehörden der großen Seehäfen besteht Kontakt bezüglich der Genehmigungslage bei Bebunkerungen mit alternativen Energieträgern. Auch sind bestimmte Standorte bereits gezielt für deren Lagerung vorgesehen **[09]**. Treiber der Marktentwicklung sind wie auch im LNG-Markt Industriekunden, die größere Energiemengen nachfragen.

Bunkerlieferanten	DE BKE			DE BRE			DE BRV			DE BRB			DE CUX			DE EME			DE FLF			DE HAM			DE HGL			DE KEL			DE CKL			DE NHA			DE PUT			DE RSK			DE SAS			DE STA			DE TRV			DE WVN			DE WIS		
	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS	StS	TtS	PtS
AGRAVIS Raiffeisen AG																	x																																					x			
BMT Bunker und Mineralöltransport GmbH	x			x			x			x			x			x			x			x						x						x			x			x			x			x			x			x			x		
Boie GmbH & Co. KG																						x															x												x								
Bunker One A/S	x	x		x			x			x			x			x	x		x	x		x						x	x				x	x				x		x	x		x	x		x			x	x		x			x	x	
Carl Büttner & Jantzon Handel und Energie GmbH				x	x												x																		x																		x				
Deutsche Maxcom GmbH										x						x						x																								x						x					
ElbOil GmbH	x			x	x		x			x			x	x		x						x	x					x	x	x				x				x					x	x		x			x	x		x				x	
Empting Mineralöle GmbH	x	x		x			x			x	x		x	x	x	x	x		x						x			x						x	x		x	x		x	x		x			x	x		x			x	x		x		
Friedrich G. Frommann GmbH & Co. KG	x	x		x	x		x	x	x	x	x		x	x		x			x		x	x		x	x			x		x			x	x			x	x					x	x		x	x		x	x		x			x	x	
Fromholz-Energie GmbH																																									x			x												x	
GEFO	x	x		x			x			x	x	x	x			x	x			x		x	x					x	x				x	x				x		x	x			x		x	x		x	x		x	x		x	x	
Glüsing Transport GmbH	x	x		x			x		x	x	x		x	x	x	x	x		x			x			x			x			x			x	x		x						x			x	x		x			x	x		x		
Hamburg Bunker Service GmbH		x			x			x	x	x	x		x	x						x		x							x			x						x						x		x				x			x			x	
Hans Rinck Brennstoffe GmbH & Co. KG	x	x		x			x			x			x	x		x	x		x	x			x					x	x					x	x		x			x	x		x	x		x	x		x	x		x	x		x	x	
helios lubeoil KG					x																								x			x																									
HFG Hanse Fuels GmbH	x			x			x			x	x	x	x	x		x	x		x	x		x						x	x				x	x			x	x						x		x	x		x	x		x	x		x	x	
Hoyer Marine GmbH	x	x		x			x		x	x	x		x	x			x			x			x	x					x				x	x	x			x			x			x	x	x				x			x			x	
IBT Bunkering & Trading	x	x		x		x	x			x	x		x	x		x	x			x		x						x	x				x	x	x			x			x			x		x	x			x		x	x			x	
Köhn & Plambeck GmbH & Co. KG		x		x			x		x					x			x			x		x							x						x						x									x			x				
Kurt Ammenn GmbH & Co. KG																	x																																				x				
LDTH GmbH																																									x			x													
Mabanaft Deutschland																								x						x																											
North Sea Bunker GmbH	x			x			x			x	x	x	x	x		x	x		x	x		x						x	x				x	x									x	x		x	x		x	x		x	x		x	x	
NSG Nordic Shipping GmbH	x			x			x			x			x			x						x											x	x												x						x					
Singer Öl & Technik GmbH																				x									x									x			x			x						x						x	
team energie GmbH & Co. KG																				x									x			x																									
TotalEnergie Bitumen Deutschland										x			x									x											x													x											
Trefoil Trading B.V.										x			x									x						x																		x											

Tabelle 1 | Übersicht über die im Bunkerlieferantenverzeichnis des BSH gelisteten Anbieter nach Standorten und Bunkerkonzepten

Binnenschifffahrt

Die Bunkerservicedienstleister in der Binnenschifffahrt erstrecken sich von kleinen über mittelständische Familienbetriebe bis hin zu Anbietern, die zu Großunternehmen oder -konzernen gehören. Ähnlich heterogen gestaltet sich auch das Angebot an Bunkerkonzepten. Da die Abnahmemengen im Vergleich zur Seeschifffahrt weniger stark variieren, bieten sich generell sowohl das StS-, TtS- als auch das PtS-Bunkerverfahren an und sind entsprechend etabliert in der Binnenschifffahrt. Die einzelnen Verfahren können dabei wie folgt beurteilt werden:

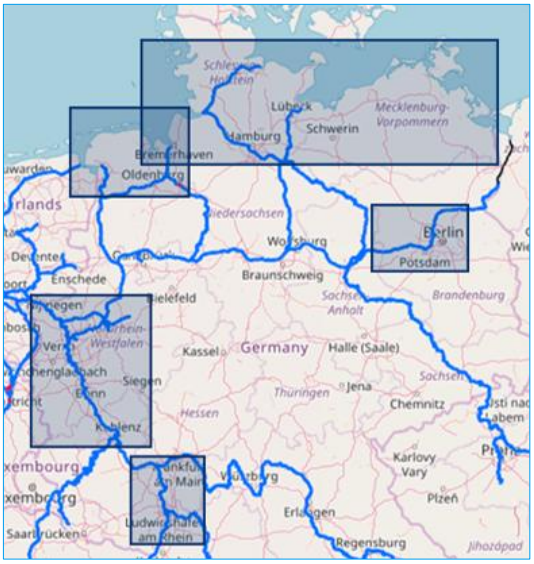
StS:	Einsatz voraussichtlich häufig an Verkehrsknotenpunkten oder Umschlagschwerpunkten; Bunkermenge und Anzahl der Bunkerschiffe lassen vermuten, dass StS am häufigsten eingesetzt wird
TtS:	Hohe Flexibilität bei kleinem Volumen, ergänzender Einsatz zu StS bei kleinen Abnahmemengen
PtS:	Problematik des Verholens, Einsatz im Umkreis von Tanklagern zu erwarten

Den veröffentlichten Daten des Bundesverbandes der Deutschen Binnenschifffahrt e.V. ist zu entnehmen, dass im Jahr 2022 48 Bunkerschiffe für die Binnenschifffahrt registriert waren **[28]**. Die Anzahl der Bunkertrucks ist nicht bekannt. Den 48 Bunkerschiffen wird eine Tragfähigkeit von 7.605 t zugeschrieben. Durchschnittlich verfügt jedes Bunkerschiff folglich über 160 t Tragfähigkeit (ca. 180 m^3). Bunkerschiffe mit entsprechendem Tankvolumen weisen sehr überschaubare Abmaße mit Längen zwischen 30 und 40 m und Breiten von 6 bis 7 m auf. Für zukünftig steigende Bedarfe kann es daher eine Option sein, moderat größere Schiffe einzusetzen.

Das Angebot in der Binnenschifffahrt umfasst vor allem Dieselkraftstoff (siehe auch Kapitel 3.3). Daneben spielt auch der Servicegedanke eine große Rolle, weshalb das Angebot der Bunkerservicedienstleister in vielen Fällen auch die Versorgung mit Frischwasser, Ausrüstung, Schmierstoffen, Harnstofflösungen und Motorölen umfasst. Größere Bunkerservicedienstleister in der Binnenschifffahrt, wie z. B. Hoyer Marine, betreiben neben einer Tankwagenflotte für örtlich flexible Kraftstofftransfers auch Bunkerbargen, die teils ganze Hafenverbünde bedienen, sowie Bunkerstationen für regelmäßige standortgebundene Übergaben.

Abbildung 12 | Bunkerstandorte von Hoyer Marine [12]

Recherchen zu der örtlichen Verteilung der Bunkerschiffe für die Binnenschifffahrt anhand der öffentlich verfügbaren Daten zu den Flotten bekannter Bunkeranbieter zeigen, dass diese sich vor allem entlang der Küsten an Häfen agglomerieren, die ebenfalls als Seehafen fungieren und zudem häufig über Zugang zu Binnenwasserstraßen verfügen.



Standorte	Bunker-boote	Bunker-stationen	Bunker-ponton
Duisburg	2	x	
Koblenz/Neuwied	1	x	
Mainz	2		
Mannheim	1	x	
Regensburg	1	x	
Magdeburg	1		
Berlin	1		
Hohensaaten			1
Rüdesheim/Bingen	1		
Dortmund-Ems-Kanal und Mittellandkanal	2	x	
Hamburg	14	x	
Datteln	2		
Haren (Ems)	1		
Brunsbüttel		x	
Bremerhaven		x	
Mukran		x	
Wittingen			
Bremen	3		
Minden			
Köln	1		
Passau	1		
Großraum Düsseldorf	1		
Nord- und Ostseehäfen* (jährl. Umschlagvol. > 5 Mio. t)	14		
Wilhelmshaven		x	
NOK		x	
Cuxhaven		x	
Leer und Papenburg	1		
Kiel		x	
Borkum		x	
Flensburg		x	
Binnenwasserstraße	6		
Insgesamt			**56**

*Stand 2022: Hamburg, Brunsbüttel, Bremerhaven, Wilhelmshaven, Rostock, Lübeck, Brake, Stade/Bützfleth.

Abbildung 13 | Agglomerationsgebiete Bunkerschiffe Binnenschifffahrt

Da davon auszugehen ist, dass für Bunkervorgänge in Seehäfen Bunkerschiffe sowohl für die Bedienung von Binnen- als auch von Küsten- und kleineren Seeschiffen eingesetzt werden, kann hier keine klare Abgrenzung erfolgen, sondern es ist anzunehmen, dass ein Teil der Bunkervorgänge der Binnenschifffahrt durch Bunkerstrukturen abgedeckt werden kann, die durch einen Ausbau der Strukturen für die Seeschifffahrt erschlossen werden können.

Im Bereich der alternativen Kraftstoffe bestehen bislang vereinzelte LNG-Angebote. Sowohl in Duisburg als auch Köln gibt es feste LNG-Bunkerstationen und darüber hinaus örtlich flexible Bunkermöglichkeiten per Tankwagen. Vereinzelte Pilotprojekte, wie z. B. das Kanalschubboot „ELEKTRA" **[10]** oder das Vorhaben „Future Proof Shipping" **[11]**, erproben zudem den Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff in der Binnenschifffahrt. Die Versorgung erfolgt bei diesen Schiffen im CtS-Verfahren und wird bislang von Großanbietern im Bereich Industriegase übernommen. Ähnlich wie bei Seeschiffen bietet sich auch bei Binnenschiffen eine Umrüstung auf Methanol aus technischer Perspektive an.

3.5 Kraftstoffoptionen und Technologieszenarien für die betreffende Flotte

Zum Abschluss der Betrachtung des Status quo werden Kraftstoffalternativen untersucht, die in Zukunft durch See- und Binnenschiffe in deutschen Häfen nachgefragt werden könnten und für die somit Bunkerstrukturen bereitzustellen sind. Die Eignung der Kraftstoffoptionen für verschiedene Schiffstypen in der See- und Binnenschifffahrt hat maßgeblich Einfluss auf die Eingangsparameter der Bunkermengenszenarien in Kapitel 4.3. Auf Grundlage der Erfahrungen des eingesetzten Projektbeirats, der interviewten Experten und des Gutachterteams wurden folgende alternative Energieträger in der vorliegenden Studie untersucht:

- LNG
- Methanol
- Ammoniak
- Wasserstoff

Auch Erweiterungen der Antriebseinheit um Technologien zur Reduktion bzw. Vermeidung von Schadstoff- und CO_2-Ausstößen könnten in der Schifffahrt zukünftig eine Rolle spielen. Hier ist

insbesondere das Prinzip der Kohlenstoffabscheidung und -speicherung *(Carbon Capturing and Storage – CCS)* an Bord zu nennen. Denkbar ist hierbei insbesondere der Einsatz von Carbon Capturing für die anteiligen Emissionen eingesetzter Pilot Fuels, sofern diese nicht nachhaltigen Ursprungs sind. Grundlage des Prinzips ist es, bei der Umsetzung von Kraftstoff in Antriebsenergie frei werdenden Kohlenstoff kontrolliert abzufangen und so zu speichern, dass eine Freisetzung in die Atmosphäre verhindert wird. Der gespeicherte Kohlenstoff soll dann einem Kreislaufsystem für die erneute Nutzbarmachung zugeführt werden.

Ein entsprechender Kohlenstoffkreislauf erfordert neben schiffsseitigen Installationen auch ein separates landseitiges Netzwerk von Anlagen zum CO_2-Transfer, zur Zwischenspeicherung sowie zur Verarbeitung in den Häfen. Aufgrund der Komplexität derartiger Lösungen und der nur eingeschränkten Schnittmenge zu Bunkerstrukturen bleibt dieses Thema in der vorliegenden Analyse unberücksichtigt.

Um die Relevanz der einzelnen analysierten Kraftstoffe (LNG, Methanol, Ammoniak, Wasserstoff) und alternativen Gestehungspfade hin zu einer CO_2-freien Schifffahrt zu unterstreichen, listet Tabelle 2 ausgewählte Referenzprojekte. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde explizit keine Gegenüberstellung von Angebot und Nachfrage vorgenommen. Die dargestellte Liste dient lediglich der Argumentationsuntermauerung, dass die ausgewählten Kraftstoffoptionen (regional) erzeugt und bereitgestellt werden. Eine Quantifizierung der erzeugten Mengen hinsichtlich der prognostizierten Bunkerbedarfe erfolgt nicht.

		Betreiber	Kapazität	Inbetriebnahme	Ort	Ergänzungen
Produktion	Wasserstoff	**Hy2gen Germany GmbH**	6,3 MW (900 t/a geplant)	2013	Werlte, Deutschland	Ehemals Kiwi AG
		P2X Solutions Oy	20 MW (2024) à 1 GW (2031)	2024 bis 2031	Harjavalta, Finnland	
		Lhyfe	330 t/Tag Wasserstoff	2029	Lubmin, Deutschland	
		HH2E AG	6.000 t/a (2025) -> 60.000 t/a (2030)	2025 bis 2030	Lubmin, Deutschland	
		Hy2gen Germany GmbH	312 t/a	2023	Rheinland-Pfalz, Deutschland	Mobile Einheit
		HY.City.Bremerhaven GmbH & Co. KG	2 MW -> 280 t/a	2023	Bremerhaven, Deutschland	Gründer GP JOULE und Green Fuels
	Bio-Wasserstoff	Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, Wasserstoff auch aus Biomasse oder mit Hilfe von Mikroorganismen und Algen zu gewinnen. Jedoch handelt es sich hierbei um ein Nischenthema und viele der Konzepte befinden sich noch im Stadium der Grundlagenforschung.				
	E-LNG	**Tree Energy Solutions (TES)**	1 Mio. t/a E-LNG	Bis 2030	USA, Australien, VAE	
		Hy2gen Germany GmbH	1.800 t/a E-LNG geplant	2013	Werlte, Deutschland	Ehemals Kiwi AG
		Nordic Ren Gas	160 GWh/a E-Methan	2026	Tampere, Finnland	Nordic Ren Gas hat einen Abnahmevertrag mit Gasum
		Koppö Energia	55.000 t E-LNG	2025	Kristinestad, Finnland	Joint Venture Prime Capital und CPC Finland
	Bio-LNG	**Attero, Nordsol** Titan (Abnehmer)	6 Mio. m^3 Biogas werden zu 2.400 t/a Bio-LNG, 5.000 t/a Biogene-CO_2	2024	Wilp, Niederlande	Joint Venture von Attero, Nordsol, Titan
		Wärtsilä Gas Solution	63.000 t/a Bio-LNG	Q1 2024	Burghaun, Deutschland	
		Titan, BioValue, Linde Engineering	200.000 t/a Bio-LNG	2025	Amsterdam, Niederlande	Joint Venture von Titan, BioValue, Linde Engineering

		Betreiber	Kapazität	Inbetriebnahme	Ort	Ergänzungen
Produktion	E-Ammoniak	**Hyphen Hydrogen Energy**	1 Million t/a	2026	Namibia	Anteilseigner von Hyphen: Enertrag, Nicholas; Abnehmer: RWE
		OCI Global	80.000 t/a (2025) 160.000 t/a (2026)	2025	Beaumont, USA	
		Fertiglobe	90.000 t/a	2022/2023	Suez Canal Economic Zone, Ägypten	Joint Venture von Adnoc und OCI Global
	Bio-Ammo-niak	Die Desktop-Recherche und Marktbeobachtungen der letzten Jahre zeigen, dass Bio-Ammoniak aktuell ein Randthema ist, dass kaum Eingang in die Diskussion rund um die Generierung von alternativen Kraftstoffen findet. Folgende Bio-Ammoniak-Lieferantenbeziehung wurde Ende 2023 bekanntgegeben: OCI Global wird an das Chemieunternehmen Röhm für dessen Produktion Bio-Ammoniak liefern.				
	E-Methanol	**European Energy A/S, Mitsui & Co. LTD**	32.000 t/a	2024	Kasso, Dänemark	Abnehmer: Maersk, Lego Group, Novo Nordisk
		Ørsted A/S, EU Catalyst Partnership	55.000 t/a	2025	Örnsköldsvik, Schweden	Projekttitel: FlagshipONE
		European Energy A/S, Maersk	300.000 t/a	2025	Nord- und Südamerika	
		Proman, Maersk	100.000 t/a (Bio- und E-Methanol)	2025	Nordamerika	
		EEW, East Energy	16.000 t/a	2025	Stavenhagen, Deutschland	East-Energy-Errichtung eines Solarparkes
		ttz Bremerhaven	500 g/d	2023	Bremerhaven, Deutschland	Projektname: MariSynFuel -> Kraftstoff für das Forschungsschiff „Uthörn"
	Bio-Metha-nol	**CIMC ENRIC, Maersk**	50.000 t/a (2024) 200.000 t/a (nach 2025)	2024	China	
		WasteFuel, Maersk	30.000 t/a	2024	Südamerika	
		Hy2gen Germany GmbH	60.000 t/a	Q4 2027	Friesoythe, Deutschland	Projekttitel: Nautilus

Tabelle 2 | Referenzprojekte für die Erzeugung alternativer Kraftstoffe (Wasserstoff, LNG, Ammoniak, Methanol)

Nachfolgend werden die *Key Critical Factors* der genannten Kraftstoffalternativen untersucht. Ziel ist es, Anhaltspunkte dafür zu liefern, wann die Marktreife eintritt, Markteintrittszeitpunkte erreicht werden und für welche Schiffstypen sich welche Kraftstoffe generell eignen.

Bei der Umstellung auf alternative Energieträger müssen die unterschiedlichen Anforderungen im Betrieb der verschiedenen Schiffstypen berücksichtigt werden. Entscheidend ist hier u. a. die Energiedichte der Kraftstoffe. Großcontainerschiffe im Linienverkehr zwischen Asien und Europa bunkern in der Regel nur mit geringer Frequenz, häufig am Start- oder/und Zielhafen, und benötigen deshalb einen Kraftstoff mit hoher Energiedichte. Ganz anders ein Fährschiff, das eher kurze Strecken zurücklegt und somit eine hohe Anlauffrequenz aufweist, die auch mehr Spielraum für Bunkervorgänge bietet.

In Tabelle 3 sind volumetrische (raumbezogene) und gravimetrische (gewichtsbezogene) Energiedichten verschiedener alternativer Schiffskraftstoffe im Vergleich zu MGO sowie weitere relevante stoffliche Eigenschaften gelistet. Die Alternativen liefern bei gleichem Volumen sowie gleichem Gewicht nahezu ausschließlich weniger Energie als etablierte Schiffskraftstoffe. Diese Eigenschaft hat weitreichende Auswirkungen auf nahezu alle Bereiche der Supply Chain, bspw. müssen bei der Nutzung des Kraftstoffs entweder geringere Reichweiten oder größere Bunkertanks in Kauf genommen sowie Gewichtsrestriktionen beachtet werden. Für die Bunkerindustrie bedeuten die geringen volumetrischen Energiedichten vor allem, dass (bei gleichem Energieverbrauch) ein höheres Kraftstoffvolumen verbunkert werden muss. Hinzu kommt beim Einsatz von kryogen und komprimiert gelagerten Gasen als Kraftstoff, dass die Tanksysteme in der Regel deutlich massiver ausgeführt werden müssen, was ebenfalls zu weniger verfügbarem Volumen und höherem Gewicht des Gesamtsystems führen kann **[16]**.

Die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Kraftstoffe bedingen nicht nur ihre Energiedichte, sondern auch die Anforderungen an die Lagerung an Land und an Bord, Umschlag, Bunkervorgänge sowie das grundlegende Funktionsprinzip der eingesetzten Antriebstechnologie.

So wiesen z. B. Wasserstoff und einige seiner Derivate Eigenschaften auf, die sich hinsichtlich des Gefahrenpotenzials deutlich von heutigen Kraftstoffen unterscheiden. Besondere Herausforderungen werden vor allem durch ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften (z. B. toxisch, explosiv, leicht entzündlich) bewirkt und können bspw. veränderte Anforderungen an

- Druck- und Temperaturstufen bei Transport und Lagerung,
- die Sicherheit (Abstände, Ausrüstung, geschultes Personal etc.),
- den Platzbedarf,
- geeignete Materialien,
- weitere Nutzungen in der unmittelbaren Umgebung sowie
- SIMOP

stellen. Die Handhabung dieser Stoffe stellt demzufolge neue Anforderungen an die Bunkerindustrie. Ein Überblick über die wesentlichen stofflichen Eigenschaften, die u. a. die Anforderungen an die Lagerung der Stoffe maßgeblich bestimmen, kann Tabelle 3 entnommen werden. Die ebenfalls abgebildeten Kennzeichnungen des global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS) geben einen Überblick über die mit den Produkten einhergehenden Gefahren.

Eigenschaften	HFO	MGO	MDO	LNG	Methanol	Ammoniak	H_2 (verflüssigt)	H_2 (Druck)
Aggregat-zustand	Flüssig (1 bar, 25 °C)	Flüssig (1 bar, 25 °C)	Flüssig (1 bar, 25 °C)	Flüssig (1 bar, –163 °C)	Flüssig (1 bar, 25 °C)	Flüssig (1 bar, –50 °C)[1]	Flüssig (1 bar, –252 °C)	Gasförmig (700 bar, 25 °C)
Energiedichte [MWh/m³]	11,11	10,65	10,63	6,25	4,38	3,62	2,37	1,4
Heizwert [MWh/t]	11,22	11,83	11,81	13,89	5,53	5,17	33,33	33,33
Dichte [t/m³]	0,990	0,900	0,900	0,450	0,792	0,700	0,071	0,042
Flammpunkt bei 1 bar [°C]	> 60	> 43 (DMX) > 60 (weitere)	> 60	–187 bis –135	11	-	-	-
Zündtemp. bei 1 bar [°C]	250	250	250	595	455	630	465	465
Exp.-Grenzen [Vol.-%]	-	-	-	4,4–16,5	6,0–36,0	15,4–33,6	4,0–76,0	4,0–76,0
GHS-Kenn-zeichnung								

Tabelle 3 | Typische stoffliche Eigenschaften herkömmlicher und alternativer Schiffskraftstoffe

[1] Ammoniak kann bei ca. 10 bar und Umgebungstemperatur auch unter Druck verflüssigt werden.

Ein maßgebliches Hindernis bis hin zu einem Showstopper für die zeitnahe Implementierung alternativer Kraftstoffe in der Schifffahrt stellt darüber hinaus der weitgehend noch unzureichende regulatorische Rahmen für die Zulassung von Schiffen dar. Eine entsprechende Einordnung erfolgt in Kapitel 4.2.

Neben dem Zugang zu entsprechenden (nach Möglichkeit nachhaltig biogen oder strombasiert produzierten) Mengen alternativer Kraftstoffe und einer adäquaten Regulatorik ist die Marktverfügbarkeit von Antriebstechnologien für jene Energieträger eine wichtige Voraussetzung für eine dynamische Durchdringung des Schiffsbunkermarkts. Insbesondere Motorenhersteller aus dem europäischen Raum haben sich auf dem heute noch durch Verbrennungsmotoren dominierten Markt für Antriebstechnologien in der Schifffahrt bereits hervorgetan. In Tabelle 4 ist beispielhaft das Portfolio von MAN ES im Bereich der Zweitaktmotoren aufgeführt. Für LNG und Methanol gibt es bereits dedizierte Modelle. Ein Ammoniakmotor befindet sich in der finalen Testphase, soll 2024 zum ersten Mal ausgeliefert und ab 2026 regulär auf kommerziellen Schiffen genutzt werden **[19]**.

Kraftstoff	MC	ME-B	ME-C	ME-GI	ME-GA	ME-GIE	ME-LGIM	ME-LGIP
VLSFO	Design*	Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design
HFO	Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design
LNG			Umrüstbar	Design	Design	Design	Umrüstbar	Umrüstbar
Methanol			Umrüstbar	Umrüstbar		Umrüstbar	Design	Umrüstbar
LPG			Umrüstbar	Umrüstbar		Umrüstbar	Umrüstbar	Design
Ammoniak			Umrüstbar	Umrüstbar		Umrüstbar	Umrüstbar	Umrüstbar

***Design: Im Designportfolio des Herstellers etabliert/verfügbar.**

Tabelle 4 | Zweitaktmotoren-Produktportfolio der MAN ES inkl. möglicher Umrüstbarkeiten

Auch im Viertaktmotoren-Portfolio führender Hersteller gibt es bereits dedizierte Modelle für LNG und Methanol (siehe Tabelle 5). Wärtsilä hat z. B. darüber hinaus im November 2023 den ersten kommerziell verfügbaren Ammoniak-Viertaktmotor auf den Markt gebracht (Wärtsilä 25) **[20]**. MAN ES entwickelt einen Dual-Fuel-Viertaktmotor (Projekt AmmoniaMot), der sowohl mit Dieselkraftstoff als auch Ammoniak betrieben werden kann **[21]**.

Kraft-stoff	MAN-Viertakt-Motorenportfolio									Wärtsilä-Viertakt-Motorenportfolio								
	L+V 51/60DF	L+V 48/60CR	L35/44DF	L+V 32/44CR	L+V 32/40	V28/33D	L27/38	L21/31	175D	14	20(DF)	26	31(DF)/ (SG)	32	34DF	46(DF)	32M	46TS-DF
VLSFO	Design	Design	Design	Design	Design		Design	Design			Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design
HFO	Design	Design	Design	Design	Design		Design	Design			Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design
MDO/ MGO	Design	Design	Design	Design		Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design	Design
LNG	Design		Design								(Design)		(Design)	Um-rüst-bar	Design	(Design) + um-rüstbar		(Design)
MeOH	Umrüst-bar*	Umrüst-bar*			Umrüst-bar*			Umrüst-bar**	Umrüs-tung vor-gesehen		Design***			Design***		Design***	Design	Design***
LPG	Keine Angaben												(Design, nur SG)					
NH_3	Entwicklung eines Dual-Fuel-Viertaktmotors (Projekt AmmoniaMot), der sowohl mit Dieselkraftstoff als auch Ammoniak betrieben werden kann									Wärtsilä 25 als erster kommerziell verfügbarer Viertaktmotor im maritimen Anwendungsbereich								

Tabelle 5 | Viertaktmotoren-Produktportfolio der MAN ES und von Wärtsilä inkl. möglicher Umrüstbarkeiten[2]

*Für die Nutzung von Methanol als Hauptkraftstoff soll planweise ab 2024 die *Port-Injection*-Technologie zum Einsatz kommen und die Umrüstbarkeit von neuen Diesel- und Dual-Fuel-Motoren ermöglichen.
**Für GenSets.
***Das Design der Neumotoren wird schrittweise angepasst. Eine etwaige Umrüstbarkeit bestehender Motoren richtet sich nach Potenzial und Marktnachfrage.

[2] Basierend auf Daten der ebenfalls durch Ramboll erstellten und durch das DMZ in Auftrag gegebenen Studie „Kraftstoffanalyse in der Schifffahrt nach Segmenten" (veröffentlicht Juni 2022) [16]. Die Daten wurden in Austausch mit den Herstellern MAN ES und Wärtislä zusammengestellt.

Gerade bei Kraftstoffpfaden, die dem Einsatz von Verbrennungsmotoren bedürfen, sind Risiken durch Schlupf und klimaschädliche Abgase zu berücksichtigen. Hier seien insbesondere die Problematik des Methanschlupfes bei LNG-Motoren und die Entstehung von Lachgas für Ammoniakverbrennungsmotoren genannt. Eine dezidierte Berücksichtigung von Risiken, wie potenziellem Schlupf, würde die Komplexität der vorliegenden Studie überschreiten und ist daher nicht inkludiert.

Sowohl die Untersuchung des Motorenportfolios als auch Expertenbefragungen ergeben, dass die Einführung neuer Kraftstoffe in der Seeschifffahrt langfristig durch technische Entwicklungen im Bereich der Kraftstoff-, Motoren- und Antriebssysteme aktiv unterstützt wird. Die führenden Schiffsmotorenhersteller entwickeln sowohl Zweitakt- als auch Viertakt-Verbrennungsmotoren für alternative Kraftstoffe. Für Wasserstoff gibt es im Bereich der Verbrennungsmotoren bisher einzelne Angebote, z. B. durch den Hersteller Anglo Belgian Corporation **[22]**. Zudem beteiligen sich weitere große Motorenhersteller an Entwicklungsprojekten für langsam-, mittel- und schnelllaufende Wasserstoff-Verbrennungsmotoren. Eine weitere, vor allem für Wasserstoff interessante Antriebstechnologie ist die Brennstoffzelle.

Seeschifffahrt

Dass aktuell noch nicht alle Rahmenbedingungen für die Implementierung kohlenstoffarmer und erneuerbarer Schiffskraftstoffe geschaffen sind, man jedoch auf einem guten Weg zur Etablierung in der Schifffahrt ist, spiegelt sich auch beim Blick auf die Entwicklung von Main Bunker Fuels von Seeschiffen wider, die in Abbildung 14 veranschaulicht ist. Betrachtet wurden dabei alle Seeschiffe, die seit dem Jahr 2015 in Dienst gestellt wurden bzw. bis zum Jahr 2028 in Dienst gestellt werden sollen.

Während bis zum Jahr 2020 ausschließlich LNG als Alternative zu den etablierten Kraftstoffen am Markt zu beobachten war, hat sich das alternative Kraftstoffportfolio seitdem diversifiziert und auch einen deutlich höheren Anteil eingenommen. Insbesondere mit Methanol und LNG betriebenen Schiffen ist eine wachsende Anzahl an Bestellungen zuzuschreiben, während mit Ammoniak betriebene Schiffe aufgrund der zeitlich etwas versetzten Marktverfügbarkeit der entsprechenden Antriebstechnologien sowie der noch unzureichenden regulatorischen Rahmenbedingungen (siehe auch Kapitel 4.2) noch keine Rolle spielen.

Ab dem Jahr 2026 nehmen alternative Schiffskraftstoffe als Dual-Fuel-Antrieb bereits den Großteil des Orderbuches ein und überflügeln die etablierten, ölbasierten Kraftstoffe. Trotz der mit fortschreitendem Zeithorizont abnehmenden Repräsentativität der Darstellung (aufgrund der geringeren Anzahl an bereits feststehenden Bestellungen) ist bereits das gegenwärtige weltweite Orderbuch aufgrund der Langlebigkeit des Investitionsobjektes Schiff als Indikator für derzeit antizipierte zukünftige Kraftstoffstrategien zu verstehen.

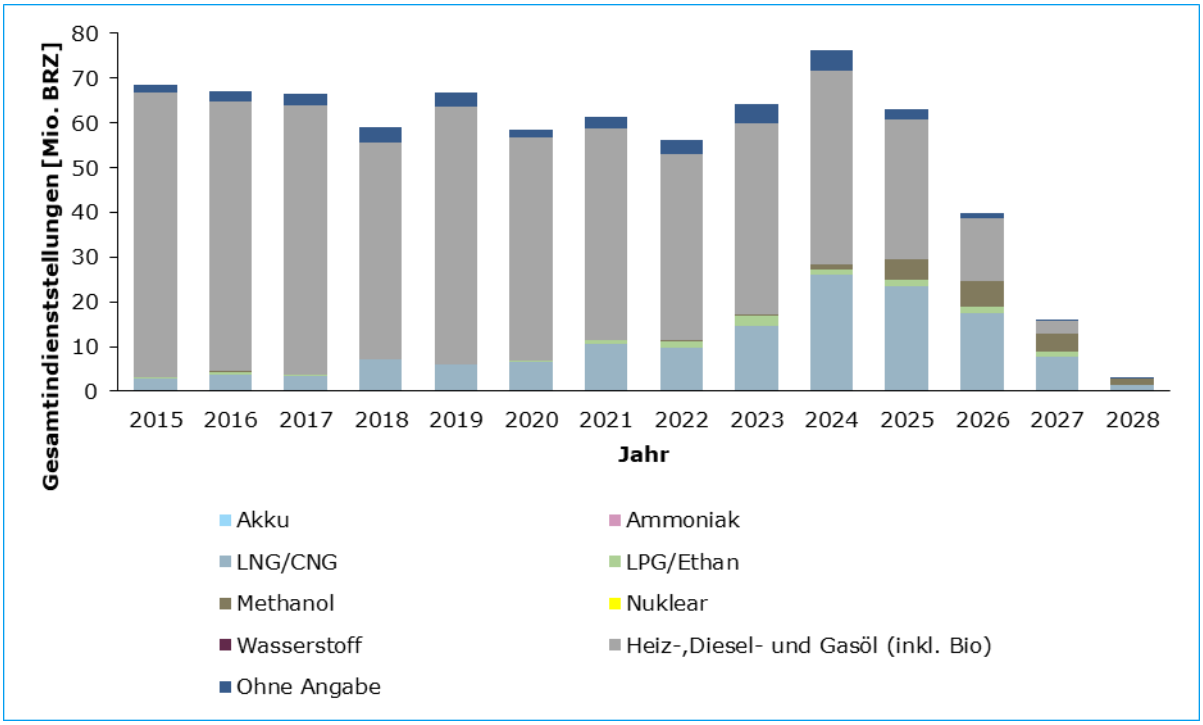


Abbildung 14 | Main Bunker Fuel von Seeschiffen nach Indienststellungsjahr

Die Entscheidung für einen bestimmten Kraftstoff ergibt sich immer aus den individuellen Eisatzbedingungen des jeweiligen Schiffs. Auf Basis der heute vorliegenden Informationen kann dennoch eine Indikation getroffen werden, welche Schiffskraftstoffe sich für welche Schiffssegmente am ehesten, nur bedingt oder eher weniger eignen. Eine solche Untersuchung wurde in Tabelle 6 vorgenommen. Die Halbkreise zeigen eine grundsätzliche Eignung des Kraftstoffs an, ganze Kreise symbolisieren eine breite Anwendbarkeit für den jeweiligen Schiffstyp. Des Weiteren weist die Matrix die Segmente aus, für die nach AFIR eine Landstrompflicht vorgesehen ist, um den Kraftstoffverbrauch während der Liegezeiten zu minimieren. Von besonderer Relevanz ist der Umstieg auf emissionsreduzierte Kraftstoffe bei

- Containerschiffen,
- Massengutfrachtern,
- Stückgutfrachtern und
- Öltankern,

da diese Segmente für rund drei Viertel der weltweiten Kraftstoffnachfrage durch Seeschiffe verantwortlich sind. Unter Beachtung der heute nahezu ausschließlichen Nutzung etablierter, fossiler Schiffskraftstoffe sind diese Schiffstypen folglich auch für den größten CO_2-Fußabdruck verantwortlich und besitzen daher das größte Potenzial für Emissionsreduzierungen.

Kraftstoffoption	Container-schiffe	Massengut-frachter	Stückgut-frachter	Auto-transporter	Kreuzfahrt-schiffe	Chemikalien-tanker	Ro-Ro-Schiffe	Öltanker	Ro-Ro-/ Passagier-fähren	LPG-Tanker	Kühlschiffe	LNG-Tanker	Offshore-schiffe	Passagier-schiffe	Andere Flüssigtanker	Yachten
Diesel	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◑	○	◑	○	○	○	○
LNG	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	◑
LPG	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	◑
Methanol	●	◑	●	●	●	◑	●	◑	●		◑		●	●	◑	●
Ammoniak	●	◑	●	●	◑	◑	●	◑	◑	◑	◑		●	◑	◑	
Wasserstoff							◑		◑				◑	◑		◑
Akku									◑					◑		
*Landstrompflicht.	✓				✓				✓					✓		

Tabelle 6 | Eignung alternativer Kraftstoffe nach Seeschiffssegment[3]

Binnenschifffahrt

Die den in Kapitel 4 entwickelten Szenarien zugrunde liegende angenommene Entwicklung des Kraftstoffmixes der Binnenschifffahrt wurde auf Basis einer Metadatenanalyse in einem begrenzt vorhandenen Studienlagenbereich entwickelt. Insbesondere fanden die folgenden Studien Eingang in die getroffenen Aussagen zur Binnenschifffahrt:

BMDV (Bundesministerium für Digitales und Verkehr): Schifffahrtspolitik in der Europäischen Union (2021)

ZKR (Zentralkommission für die Rheinschifffahrt): Endbericht zur Vision 2018 (2018)

ZKR (Zentralkommission für die Rheinschifffahrt): Roadmap der ZKR zur Verringerung der Emissionen in der Binnenschifffahrt (2022)

VBW (Verein für europäische Binnenschifffahrt und Wasserstraßen e.V.): Alternative Kraftstoffe und Antriebstechnologien für Binnenschiffe. Ein Überblick. (2022)

MARIKO (Maritimes Kompetenzzentrum): Alternative Antriebe in der Binnenschifffahrt. Bunkerinfrastruktur für konventionelle und regenerative Kraftstoffe heute und zukünftig.

DMZ (Deutsches Maritimes Zentrum): Erarbeitung eines Vorschlags für technische Vorschriften zum Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff in der Binnenschifffahrt (2022)

Binnenschifffahrt (Magazin): Wie „grün" kann die Binnenschifffahrt? (2019)

BDB (Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt e.V.): Daten und Fakten in der Binnenschifffahrt 2022/2023 (2024)

Die Studien- und mediale Lage zeigt ein sehr heterogenes Bild, welche Kraftstoffoptionen in Zukunft maßgeblich in der Binnenschifffahrt eingesetzt werden. So ist dem Internetauftritt des BMDV zu entnehmen, dass derzeit auf europäischer Ebene u. a. vermehrt daran gearbeitet wird, Voraussetzungen für den Einsatz von brennstoffzellenbasierten Elektroantrieben in der Binnenschifffahrt zu schaffen. Diese eignen sich unter Berücksichtigung aktueller technologischer Entwicklungen besonders für den Einsatz von Wasserstoff oder Methanol.

Die ZKR zeichnet in ihrer Roadmap zur Verringerung der Emissionen in der Binnenschifffahrt, die sie einem der Mannheimer Ministererklärung folgenden Auftrag entwickelt hat, unterschiedliche Szenarien für die Entwicklungen der Kraftstoffoptionen in der Binnenschifffahrt, um die im

[3] Eine detailliertere Einordnung der Eingangsfaktoren und der Methodik der Zuordnung kann der ebenfalls durch Ramboll für das DMZ erstellten Studie „Kraftstoffanalyse in der Seeschifffahrt nach Segmenten" aus dem Jahr 2022 entnommen werden. [16]

Rahmen der Erklärung avisierten Reduktionen der Treibhausgase zu erreichen. Eine zentrale Erkenntnis ist, dass keine der technologischen Lösungen als Patentlösung für alle Schiffstypen und Fahrprofile geeignet ist. Die Roadmap setzt im Rahmen eines inkludierten innovativen Übergangsszenarios, das auch innovative Antriebstechnologien mit geringerem TRL berücksichtigt, wie etwa brennstoffzellenbetriebene Elektroantriebe, stark auf batterieelektrische Antriebe. Diese sollen nahezu über den gesamten Binnenschiffssektor eingesetzt werden. Zudem sind langfristig mit geringerem Anteil vor allem Wasserstoff und Methanol (sowohl in Kombination mit Brennstoffzellenantrieb als auch Verbrennungsmotor) vertreten. Auch Stufe-V-Dieselmotoren werden vor allem im Bereich der Schubboote weiterhin als deutlich relevant angesehen.

Das vom VBW veröffentlichte Papier (Autoren DST und Marin) beschreibt kurz-, mittel- und langfristige Lösungen für Kraftstoffoptionen und Antriebstechnologien in der Binnenschifffahrt. Kurzfristig werden aufgrund der unmittelbaren Verfügbarkeit der benötigten Antriebstechnologien vor allen Dingen HVO und Biokraftstoffen sowie LNG und Bio-Methan hohe Potenziale zugeschrieben. Mittelfristig sehen die Autoren den Einsatz von Methanol und Wasserstoff, u. a. da diese in den nächsten Jahren Eingang in den ES-TRIN finden sollen, sowie langfristig von Ammoniak als sinnvolle Option.

Weiterführend wurden Pressemitteilungen der letzten Jahre gesichtet, um einordnen zu können, welche Marktentwicklungen bereits öffentlichkeitswirksam annonciert wurden.

Diese zeigen, dass in anderen europäischen Ländern (hier sind vor allem die skandinavischen Länder, Belgien und die Niederlande zu nennen) stark auf Wasserstoff als Kraftstoff für die Binnenschifffahrt gesetzt wird.[4] Unterstrichen wird dies durch die zunehmende Etablierung von Pilotprojekten, wie etwa dem INTERREG-Projekt H2Ships, das die technische und ökonomische Machbarkeit von Wasserstoffbebunkerung und Wasserstoffantrieben in der Schifffahrt demonstrieren soll.

Die Metadatenanalyse zeigt auch, dass es vor allem bei einem vermehrten Einsatz von HVO und Biokraftstoffen zu starken Interessenskonflikten zwischen den Sektoren und Konkurrenz innerhalb des Verkehrssektors kommen kann. Zudem werden teilweise aufwendige Kohlenstoffkreisläufe notwendig. Da diese Kraftstoffe in regulären Dieselmotoren eingesetzt werden können, werden sie meist nicht als alleinstehende Option ausgewiesen, sondern vielmehr als Option inkludiert, den Anteil fossiler Kraftstoffe in herkömmlichen Verbrennungsmotoren kurzfristig zu reduzieren und somit eine unterstützende Funktion zur Erreichung der (vor allem mittelfristigen) Klimaziele einzunehmen. In das im Rahmen der Studie kalkulierte Szenario für die zukünftigen Bunkermengen der Küsten- und Binnenschifffahrt finden sie der Argumentation folgend langfristig keinen Eingang.

Gerade kurz- und mittelfristig wird der (L-/C-)NG-Pfad in dem kalkulierten Szenario berücksichtigt. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Gestehung des (L-/C-)NGs hierbei nicht explizit berücksichtigt ist. Zudem wird nicht zwischen Aggregatzuständen und der detaillierten Zusammensetzung des „Natural Gas" (NG) differenziert, sondern es werden verflüssigte und komprimierte Gase mit einem Methananteil von mehr als 97 % als (L-/C-)NG zusammengefasst. Um die Klimaziele der Binnenschifffahrt zu erreichen, wird jedoch davon ausgegangen, dass spätestens ab 2030 maßgeblich Bio- oder E-(L-/C-)NG eingesetzt wird.

[4] Siehe z. B. Binnenschifffahrt (Magazin): Wie „grün" kann die Binnenschifffahrt? (2019).

Bereits heute sind sowohl LNG-Neubauten als auch Retrofits stark vereinzelt in der Binnenschifffahrt zu verorten.[5] Auch Bunkerinfrastrukturen sind bereits sehr rar vorhanden, wie etwa die LNG-Bunkerstationen in Köln-Niehl oder im Duisburger Parallelhafen. Der Ausbau der Binnenschiffsflotte und Bunkerinfrastruktur bleibt jedoch, gemessen an den medialen Ankündigungen der letzten Jahre, hinter dem suggerierten Hochlauf deutlich zurück. Zudem finden die durch die bereits vorhandenen LNG-Binnenschiffe generierten Bunkerbedarfe kaum merklich Eingang in die Bunkermengenstatistiken, da Bunkervorgänge vermutlich hauptsächlich in den großen Küstenterminals (häufig Start- und Endpunkte der Reisen) oder in den Niederlanden durchgeführt werden. Es besteht jedoch langfristig Potenzial, dezentrale Erzeugungsmöglichkeiten für Bio-(L-/C-)NG stärker für die Binnenschifffahrt zu nutzen und so einen höheren Bunkerabsatz in Deutschland zu generieren.

Methanol wird mittelfristig in nahezu allen Prognosen in Studien und Artikeln als mögliche mittel- bis langfristige Kraftstoffoption für die Binnenschifffahrt erwähnt. Die geringen Anforderungen an die Lagerung und das niedrige Umweltgefährdungspotenzial des Stoffs sind ein großer Vorteil für den Einsatz auf Binnenwasserstraßen, die teilweise durch stark besiedelte Gebiete verlaufen. Der Europäische Ausschuss zur Ausarbeitung von Standards im Bereich der Binnenschifffahrt (CESNI) arbeitet bereits intensiv an Vorschriften für den Umgang mit Methanol und legte im Herbst 2023 einen Entwurf der Vorschriften für die Lagerung und Nutzung von Methanol an Bord von Binnenschiffen vor, der Eingang in die Novellierung des ES-TRIN 2025 finden soll. Methanol wird daher auch im Zuge der vorliegenden Studie als wichtiger Bestandteil des Kraftstoffportfolios für die Binnenschifffahrt angenommen.

Insgesamt ist zu resümieren, dass gerade im Bereich der Binnenschifffahrt derzeit noch große Unsicherheit herrscht, welche Kraftstoffoptionen am besten geeignet sein werden. Es ist für diese Marktlage unterstreichend anzubringen, dass in den Pressemitteilungen von konstruktions- und Logistikdienstleistern zu neu beauftragten Binnenschiffen teilweise Angaben wie „Future Fuel Ready" ohne weitere Spezifikation gemacht werden.[6] Solche Formulierungen lassen vermuten, dass auch Marktakteure aktuell noch nicht abschließend festlegen können, welche Kraftstoffoption die für sie sinnvollste sein wird.

Das nachfolgend kalkulierte Szenario für die Binnenschifffahrt umfasst analog zur Seeschifffahrt Kraftstoffpfade für Methanol, Wasserstoff und Ammoniak. Die Analyse der Entwicklung von alternativ erzeugtem NG beschränkt sich explizit nicht auf LNG.

[5] Siehe z. B. „RPG Stuttgart", gechartert von ShellTrading.

[6] Siehe z. B. Pressemitteilung von HGK vom 18.09.2023: „HGK Shipping gibt neues Gastankschiff in besonderen Dimensionen in Auftrag".

4 SZENARIEN UND MENGENGERÜSTE

4.1 Methodik

Regulatorischer Rahmen

Der aktuelle regulatorische Rahmen in Zusammenhang mit der Defossilisierung der See- und Binnenschifffahrt und dem Markthochlauf alternativer Kraftstoffe wird systematisch dargestellt auf:

- internationaler Ebene (vor allem IMO-Regularien)
- kontinentaler Ebene (vor allem EU-Regularien)
- nationaler Ebene (deutsche Gesetzgebung)
- regionaler Ebene (Regulatorik der Länder und Häfen)

Neben den geltenden Emissionszielen wird auch auf die Dynamik (bspw. Überarbeitung der IMO-THG-Strategie in 2023) etwaiger Anpassungen hingewiesen und eine Einordnung vorgenommen.

Bunkermengenszenarien

Auf Basis der Ergebnisse des AP 1 und des im AP 2 aufbereiteten regulatorischen Rahmens wird anschließend eine Bedarfsermittlung kohlenstoffarmer und erneuerbarer Schiffskraftstoffe für die Seeschifffahrt in Deutschland bis 2050 erstellt. Die Bedarfsermittlung erfolgt anhand eines Rechenmodells, das auf einem rollierenden System aufbaut. In das Rechenmodell fließen ein:

- die heutigen Anlaufzahlen der in AP 1 untersuchten Flotte nach Schiffstyp und -größe
- die Altersstruktur sowie die (unterstellte) Lebensdauer der Flottenbestandteile
- der heutige Fuel-Mix der in AP 1 untersuchten Flotte
- die erwartete Umschlagmengenentwicklung nach Gütergruppen
- die Struktur des deutschen Bunkermarkts (z. B. vornehmlich bebunkerte Schiffstypen)
- regulatorische Ziele bzw. Vorgaben zur Emissionsreduzierung
- die Energiedichte der Kraftstoffe und ihre Eignung für verschiedene Schiffstypen
- die Zeitpunkte des Erreichens der Marktreife der Kraftstoffoptionen und -technologien

Die Anlaufstatistiken und die Altersstruktur dienen als Eingangsdaten für das rollierende System, in dem die Flotte, gesondert nach Schiffstypen und -größen sowie in Abhängigkeit vom unterstellten Transportaufkommen (gemäß der Umschlagmengenentwicklung) über den Betrachtungszeitraum bis ins Jahr 2050, kontinuierlich ausgetauscht wird. Entsprechend der angenommenen Umsetzung der Defossilisierung in der Schifffahrt sowie der Eignung und Verfügbarkeit von Kraftstoffalternativen werden im rollierenden System mit herkömmlichen Kraftstoffen angetriebene Schiffe durch Einheiten ersetzt, die alternative Energieträger nutzen.

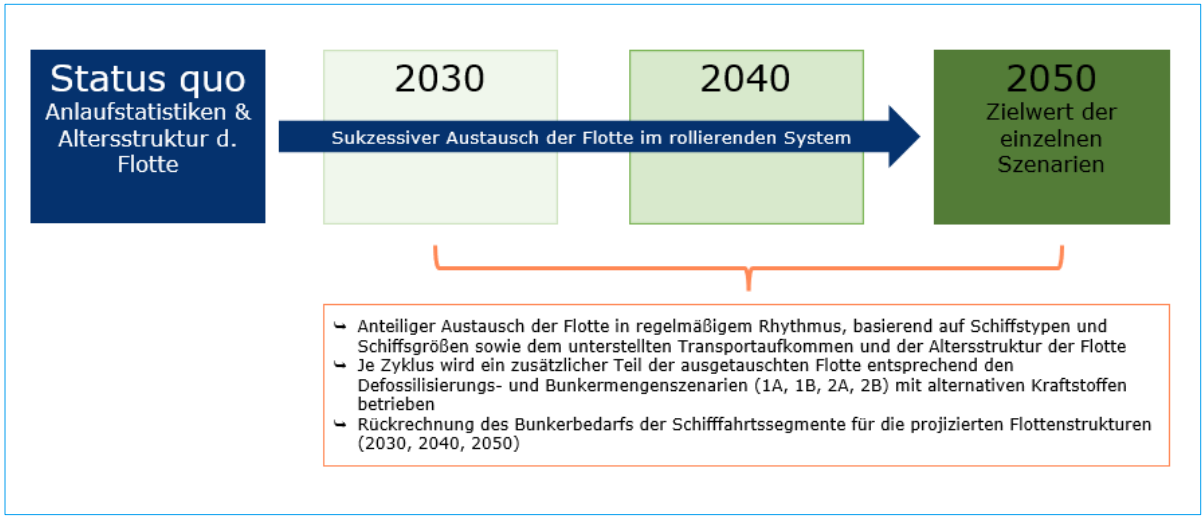


Abbildung 15 | Methodik AP 2

Neben der Marktdurchdringung alternativer Kraftstoffe im maritimen Anwendungsfeld würdigt die Bedarfsermittlung auch die Angebotsentwicklung im deutschen Bunkermarkt. So wird neben der Nutzung der heutigen Bunkerstrukturen auch das Potenzial beleuchtet, das sich durch angebotsseitige Effekte (Schaffung neuer bzw. zusätzlicher Import- und Distributionsstrukturen für alternative Kraftstoffe bzw. Energieträger) ergeben kann.

Ausgehend vom Startpunkt der Bunkermengen für die Hochseeschifffahrt in Deutschland im Jahr 2020 erlaubt das Rechenmodell auf diesem Weg eine Bedarfsermittlung mit verschiedenen Szenarien für den nachfrageseitigen Pull und den angebotsseitigen Push des deutschen Bunkermarkts.

4.2 Regulatorischer Rahmen

In einem ersten Schritt wird der bestehende regulatorische Rahmen für die Defossilisierung der See- und Binnenschifffahrt und den damit einhergehenden Markthochlauf kohlenstoffarmer und erneuerbarer Kraftstoffe auf internationaler (vor allem IMO-Regularien), kontinentaler (vor allem EU-Regularien), nationaler (deutsche Gesetzgebung) und regionaler Ebene (Regulatorik der Länder und Häfen) systematisch dargestellt.

Der regulatorische Rahmen stellt eine maßgebliche Herausforderung für die zeitnahe Implementierung alternativer Kraftstoffe in der Schifffahrt dar. Sowohl die IMO als auch die EU haben Ziele zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen gesetzt, die sich u. a. maßgeblich auf das Kraftstoffportfolio der Schifffahrt auswirken werden (siehe auch Abbildung 16). Die im Rahmen des Treffens des „Marine Environment Protection"-Komitees der IMO im Juli 2023 (MEPC 80) überarbeitete IMO-THG-Strategie strebt eine Reduzierung der Well-to-Wake-Treibhausgasemissionen um 20 % bis 2030, 70 % bis 2040 bzw. 100 % um das Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2008 an. Diese Ziele sind in keiner Weise an die Eigenschaften des Kraftstoffs gebunden, sodass auch designtechnische, operative und ökonomische Maßnahmen zur Erhöhung der Transporteffizienz bzw. Einsparung von Emissionen valide Mittel zur Konformität mit den Zielen darstellen. Die vollständige Klimaneutralität kann allerdings nur erreicht werden, wenn durch einen dynamischen Markthochlauf kohlenstoffarmer und erneuerbarer Kraftstoffe die Energieversorgung in der Schifffahrt defossilisiert wird.

Dies gilt insbesondere, da sich die in der Fuel-EU-Maritime-Initiative fixierten Ziele der EU auf das CO_2-Äquivalent des Kraftstoffs beziehen und somit auch den Bunkermarkt in Deutschland

betreffen. Die EU sieht eine Reduzierung der Well-to-Wake-Treibhausgasemissionen des Kraftstoffs um 6 % bis 2030, 31 % bis 2040 bzw. 80 % bis 2050 gegenüber dem Flottendurchschnitt des Jahres 2020 vor.

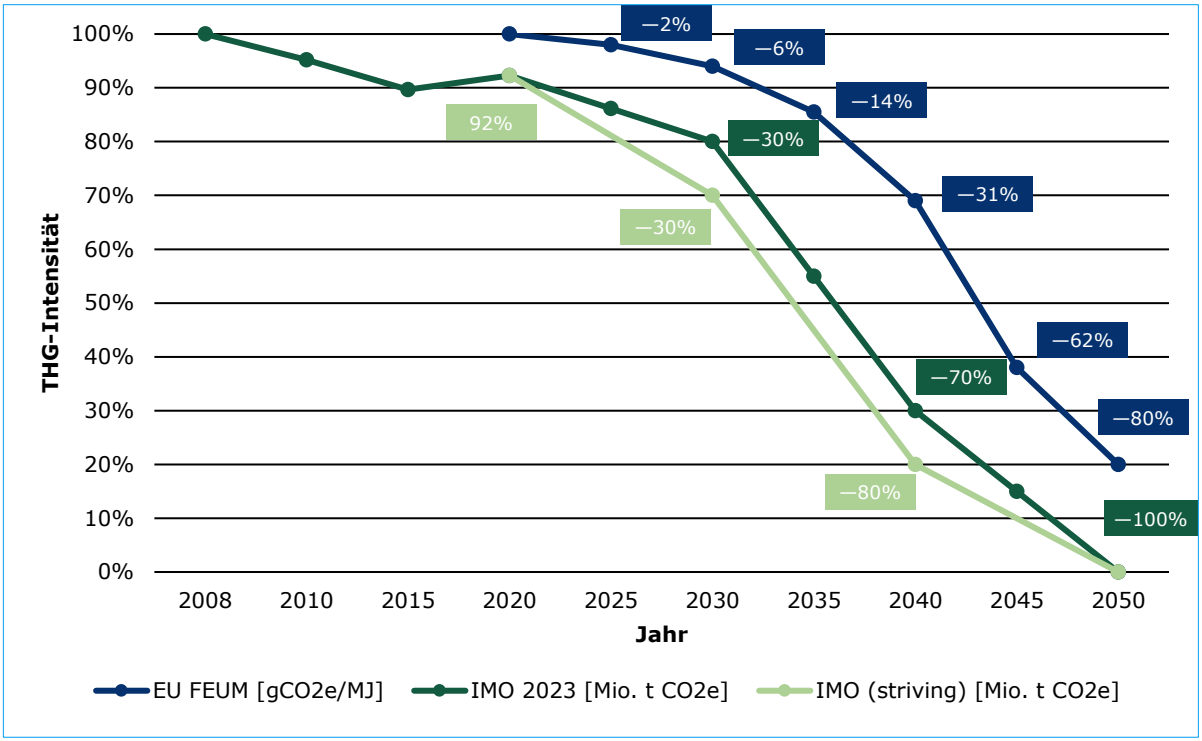


Abbildung 16 | IMO- und EU-Ziele zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Seeschifffahrt 14] [15]

Um ihren Markteintritt zu ermöglichen, ist die Zulassung alternativer Energieträger als Kraftstoff in der Seeschifffahrt eine der wichtigsten regulatorischen Teilprozesse. Die erfolgreiche Schaffung der entsprechenden Regulatorik für LNG im International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF-Code) kann als Wegbereiter für die Entwicklung angepasster Regularien für weitere Kraftstoffe mit ähnlichen Eigenschaften dienen. Es ist jedoch damit zu rechnen, dass die Nutzung von z. B. Ammoniak und Wasserstoff auch mittelfristig mit erheblichen regulatorischen Hürden verbunden sein wird. Kraftstoffe, denen keine detaillierten IMO-Regularien zugrunde liegen, müssen unter Zuhilfenahme von Klassifikationsgesellschaften und zusätzlicher zeitlicher sowie finanzieller Mittel via „Alternative Design Approach" zugelassen werden. Wichtiger Bestandteil ist hier der Nachweis eines zu bereits zugelassenen, vergleichbaren Schiffsentwürfen äquivalenten Sicherheitsniveaus. Auch der Einsatz von Kraftstoffen, die Bestandteil eines Interimsleitfadens sind (aktuell z. B. Methanol) müssen den Prozess der Zulassung als alternatives Design durchlaufen.

Einen Überblick über den aktuellen Status bei der Entwicklung von detaillierten Anforderungen für den Einsatz verschiedener Kraftstoffe enthält Abbildung 17.

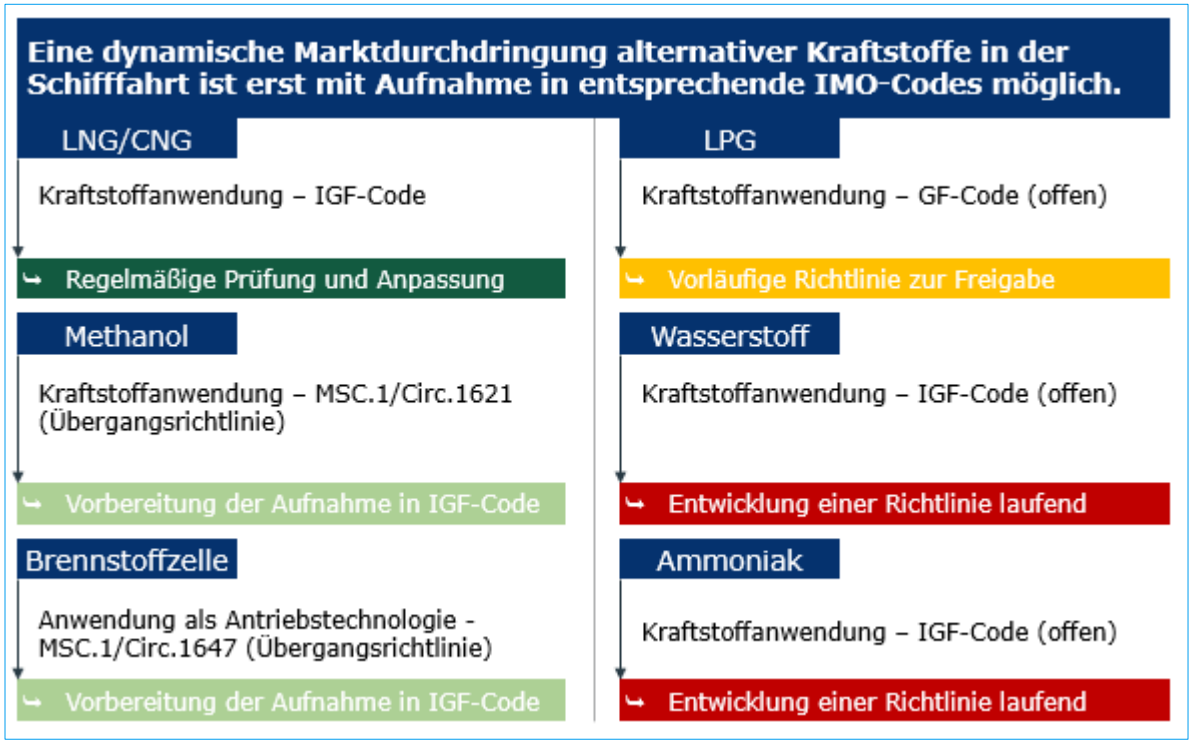


Abbildung 17 | Status der Entwicklung von Regularien für den Einsatz alternativer Schiffskraftstoffe in der Seeschifffahrt

Für die Zulassung und die technischen Details bei der Nutzung von (alternativen) Kraftstoffen in der Binnenschifffahrt gilt für die deutschen Binnenwasserstraßen der Europäische Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe (ES-TRIN) des Europäischen Ausschusses zur Ausarbeitung von Standards im Bereich der Binnenschifffahrt (CESNI) als maßgebliches regulatorisches Werk. Er enthält bereits Anforderungen an die Nutzung von LNG und soll zukünftig um weitere Alternativen, wie z. B. Methanol, erweitert werden.

Zudem formulierte die EU 2018 eine strategische Vision für ein klimaneutrales Europa bis 2050. Im Rahmen der Mannheimer Erklärung wurde diese auf die deutsche Binnenschifffahrt übertragen. Es wurden anzustrebende Ziele von 35 % Reduktion der durch die Binnenschifffahrt verursachten Treibhausgase und Schadstoffe bis 2035 und eine weitestgehende Reduktion bis 2050 im Vergleich zu den Werten von 2015 formuliert. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich hier lediglich um eine Erklärung und kein Regularium handelt. **[24]**

Im Jahr 2021 wurde des Weiteren der Aktionsplan NAIADES III der Europäischen Kommission veröffentlicht. Dieser fokussiert insbesondere das Ziel, mehr Fracht über die europäischen Binnenwasserstraßen zu befördern, sowie die Unterstützung des Übergangs zu emissionsfreien Schiffen bis 2050. **[24]**

Bindend für die Binnenschifffahrt sind die vereinbarten Vorgaben des EU Green Deals. Dieser sieht eine Reduktion der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors bis 2050 um 90 % gegenüber 1990 vor. **[23]**

Für die Binnenschifffahrt stehen demzufolge lediglich 2 Stützjahre auf Basis der Erklärung und der Regulatorik für ein Minderungsszenario zur Verfügung. Die nachstehende Abbildung 18 zeigt die Zielwerte und entsprechende Trendfunktionen (polynomisch). Zu erkennen ist, dass die Zielwerte und die Funktionen lediglich gering voneinander abweichen.

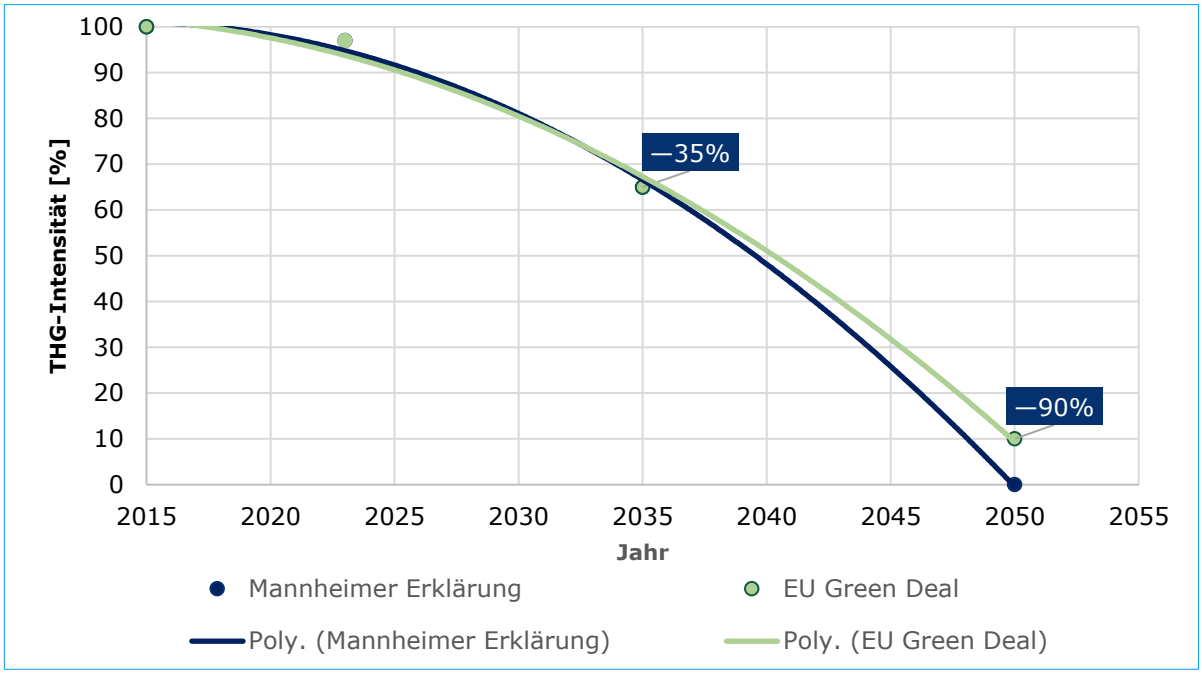


Abbildung 18 | Mannheimer Erklärung und EU-Green-Deal-THG-Reduktionsziele Binnenschifffahrt

Neben der Zulassung der gehandelten Kraftstoffalternativen ergibt sich in der deutschen See- und Binnenschifffahrt auch noch weiterer Handlungsbedarf bei der Regelung von Bunkervorgängen. Sowohl in den Gesetzestexten der Länder als auch den Hafenbenutzungsordnungen der einzelnen Häfen sind Gase (LNG, Wasserstoff, Ammoniak etc.) oder Schiffskraftstoffe mit niedrigem Flammpunkt (Methanol) in vielen Fällen noch nicht standortübergreifend harmonisiert. Die Sicherheit und regulatorische Konformität des Bunkerns alternativer Kraftstoffe muss oftmals durch spezifische Risikoanalysen nachgewiesen und durch Ausnahmegenehmigungen bestätigt werden. Regionale Unterschiede in der Regulatorik stellen nach wie vor ein Hindernis für die Erschließung des deutschen Bunkermarkts dar und eine Harmonisierung regulatorischer Prozesse zu deren Vereinfachung und zur Sicherstellung behördlicher Anforderungen und der damit verbundenen Kommunikation, z. B. zum Nachweis nötiger Sicherheitsanforderungen, könnte einen großen Beitrag zur Attraktivitätssteigerung leisten. Exemplarisch sind in Tabelle 7 Unterschiede bei der Bezeichnung und Abdeckung von Bunkerkraftstoffen in den Gesetzestexten der deutschen Seehäfen und Bundesländer aufgeführt.

In anderen Ländern, wie bspw. Schweden, gelten die Bunkerlizenzen der Serviceanbieter für alle Häfen, was den Markteintritt deutlich leichter macht.

Bezeichnung / Regelungstext	Wasser-gefähr-dende Stoffe	Flüssige (Kraft-) Stoffe (zur Eigen-versorgung von Wasser-fahrzeugen bzw. Schiffen)	Entzündbare Flüssigkeiten bzw. Schiffskraft-stoffe Flammpunkt <55°C	Tiefgekühlte verflüssigte Gase	Tiefgekühlt verflüssigte Gase, Gase unter Druck oder entzündbare Flüssigkeiten Flammpunkt <55°C	LNG
Bundeslandebene Deutschland						
Niedersächsische HO	§18 (2)					
Bremische HO			§53 (1)			
GGBVO Hamburg			§14 (1)			
HafVO Schleswig-Holstein		§25 (4)				
HSVO Schleswig-Holstein		§24 (1)			§24 (2); (4); (5); (6)	
HafVO MV				§22a (2)		
Hafenebene Deutschland						
H.Verf. Emden						X
HBO Brunsbüttel						§5
HBO Kiel		§24 (1)				
HNO Rostock		§19				
HNO Sassnitz				§16 (2)		

Tabelle 7 | Regionale Unterschiede bei der Bezeichnung und Abdeckung von Bunkerkraftstoffen in den deutschen Seehäfen 16]

Zum etablierten Status herkömmlicher Kraftstoffe in der Schifffahrt gehören auch steuerliche Vorteile, die u. a. die Steuerbefreiung nach dem Energiesteuergesetz einschließen. Ähnliche Regelungen gelten noch nicht zwingend für alternative Energieträger (z. B. Methanol).

4.3 Bunkermengenszenarien

Um die Potenziale für den Aufbau von Bunkerstrukturen für kohlenstoffarme und erneuerbare Schiffskraftstoffe in Deutschland für einen Zeithorizont bis zum Jahr 2050 ermitteln zu können, müssen für diesen Zeitraum zunächst marktplausible Szenarien für die nachgefragten Bunkermengen aufgestellt werden, die eine Unterscheidung nach den entsprechenden Kraftstoffen zulassen. Entsprechend der in Kapitel 4.1 geschilderten Methodik und ausgehend von den in Kapitel 3.3 dargestellten Bunkermengen für die Hochseeschifffahrt wurden dementsprechend szenarienbasierte Bedarfsermittlungen erstellt. Zur Bildung der Szenarien wurde sich der beiden Ebenen Bunkerangebot und -nachfrage bedient, um insgesamt 4 Bunkermengenszenarien zu generieren (siehe auch Abbildung 19).

Szenarienannahmen Angebot (1 & 2): Ausgangspunkt für die angebotsseitige Szenarienbildung sind der Bestand an Import- und Distributionsstrukturen für konventionelle Kraftstoffe bzw. Energieträger 2020 in Deutschland und die damit einhergehenden Bunkermengen. Szenariorahmen 1 spiegelt eine Entwicklung ohne Berücksichtigung angebotsseitiger Effekte durch zusätzliche Import- und Distributionsstrukturen für verschiedene alternative Kraftstoffe bzw. Energieträger wider. Szenariorahmen 2 berücksichtigt diese angebotsseitigen Effekte.

Szenarienannahmen Nachfrage (A & B): Ausgangspunkt für die nachfrageseitige Szenarienbildung sind der Fuel-Mix im Bunkermarkt 2020 in Deutschland, Annahmen zur Verkehrsentwicklung, Regulatorik sowie spezifische Energiedichten der Kraftstoffe. Bis 2025 wird der Fuel-Mix aus der gegebenen Schiffsflotte und Schiffsindienststellungen berücksichtigt.

Szenariorahmen A rechnet ab dem Jahr 2025 mit einem Ramp-up alternativer Kraftstoffe in Einklang mit Zielen der initialen IMO-Treibhausgasstrategie aus dem Jahr 2018. Der Szenariorahmen B orientiert sich ab 2025 an der zu erreichenden vollständigen Defossilisierung in Einklang mit den Zielen der neuen IMO-Treibhausgasstrategie aus dem Jahr 2023 sowie der EU.

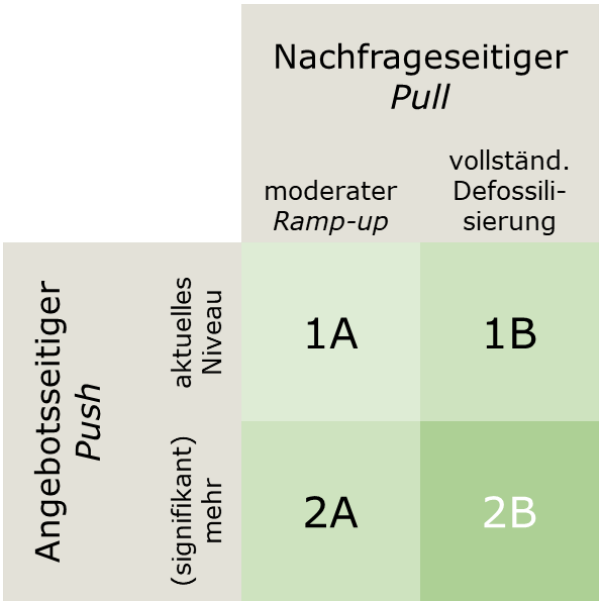


Abbildung 19 | Grundannahmen der Bunkermengenszenarien für alternative Kraftstoffe in Deutschland

Neben den in der Methodik (siehe Kapitel 4.1) aufgeführten Eingangsparametern, die in die Bunkermengenszenarien eingeflossen sind, wurden auch weitere Faktoren berücksichtigt, die zukünftig einen Einfluss auf die Entwicklung der nachgefragten Bunkermengen haben werden. Hierzu zählen u. a. die absehbaren und erwarteten Produktionsmengen der Energieträger sowie die zugrunde liegenden Gestehungspfade (fossile Gestehung, Herstellung aus Biomasse, strombasierte Produktion etc.), denen sich zum Ende des Kapitels noch einmal gesondert gewidmet wird. Daneben wurden auch Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz berücksichtigt, die von der IMO explizit als Instrument zur Verringerung der Emissionen ausgewiesen werden, da sie u. a. einen kraftstoffverbrauchsmindernden Effekt ausüben **[17]**. Zu diesen Maßnahmen zählen u. a.:

- Landstrom am Liegeplatz
- Optimierung der Fahrtgeschwindigkeit
- Wirkungsgrade der Antriebssysteme

Die Auswirkungen wurden unter Zuhilfenahme einschlägiger Fachpublikationen zum Potenzial entsprechender Maßnahmen ausgewertet **[18]**.

Seeschifffahrt

Die Ergebnisse der Bedarfsermittlung für das Bunkermengenszenario 1A, das einen moderaten Ramp-up der Defossilisierung bis 2050 bei einer Angebotsentwicklung von Bunkerprodukten in Deutschland auf heutigem Niveau zur Annahme hat, sind in Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt. Das Szenario richtet sich nach den verbürgten Defossilisierungszielen der initialen IMO-THG-Strategie von 2018 (–70 % CO_2-Emissionen und –50 % THG-Emissionen im Vergleich zu 2008 bis 2050) aus. Es inkludiert keine vollständige Dekarbonisierung bis 2050. Entsprechend der in diesem Szenario konstanten Angebotsentwicklung der deutschen Bunkerindustrie kann eine Seitwärtsbewegung der energiebezogenen Bunkermengen (Abbildung 20) abgelesen werden. Zu leichten Veränderungen der nachgefragten Bunkermengen kommt es aufgrund der im Modell berücksichtigten Veränderung der zu verrichtenden Transportleistung im Betrachtungszeitraum, die sich entsprechend auch auf die Anzahl der Schiffe und die Gesamtnachfrage nach Kraftstoffen auswirkt. Betrachtet man die gewichtsbezogene Bunkermengenentwicklung, so ist eine deutlich erkennbare Zunahme der Bunkermengen zu beobachten. Dies lässt sich mit der geringeren Energiedichte der sukzessive in den Markt strömenden alternativen Kraftstoffe erklären (siehe auch Kapitel 3.5). Mit Blick auf das Kraftstoffportfolio nimmt ab dem Jahr 2025 vor allem der Anteil der Kraftstoffe LNG und Methanol deutlich zu. Diese Mengen ersetzen vor allem etablierte Kraftstoffe, wie HFO, MDO und MGO. Aufgrund der dem Szenario zugrunde liegenden moderaten Defossilisierung wird davon ausgegangen, dass zunächst Schiffe mit sehr hohen Emissionen durch Neubauten mit am Markt verfügbaren Antriebssystemen (LNG-, methanolbetrieben) ersetzt werden.

Ab dem Jahr 2030 kommt es in diesem Szenario zu einem moderaten Anstieg der nachgefragten Ammoniakmengen im Hochseebunkerbereich. Auch hier werden besonders geeignete Schiffstypen und diejenigen Schiffe, die hohe Emissionen aufweisen, verstärkt ausgetauscht. Zusammen mit einem geringen Anteil Wasserstoff (vor allem bei kleineren Anwendern, wie Schleppern, Crew Transfer Vessels etc.) nehmen alternative Kraftstoffe in diesem moderaten Defossilisierungsszenario ungefähr 50 % des Bunkermarkts im Jahr 2050 ein.

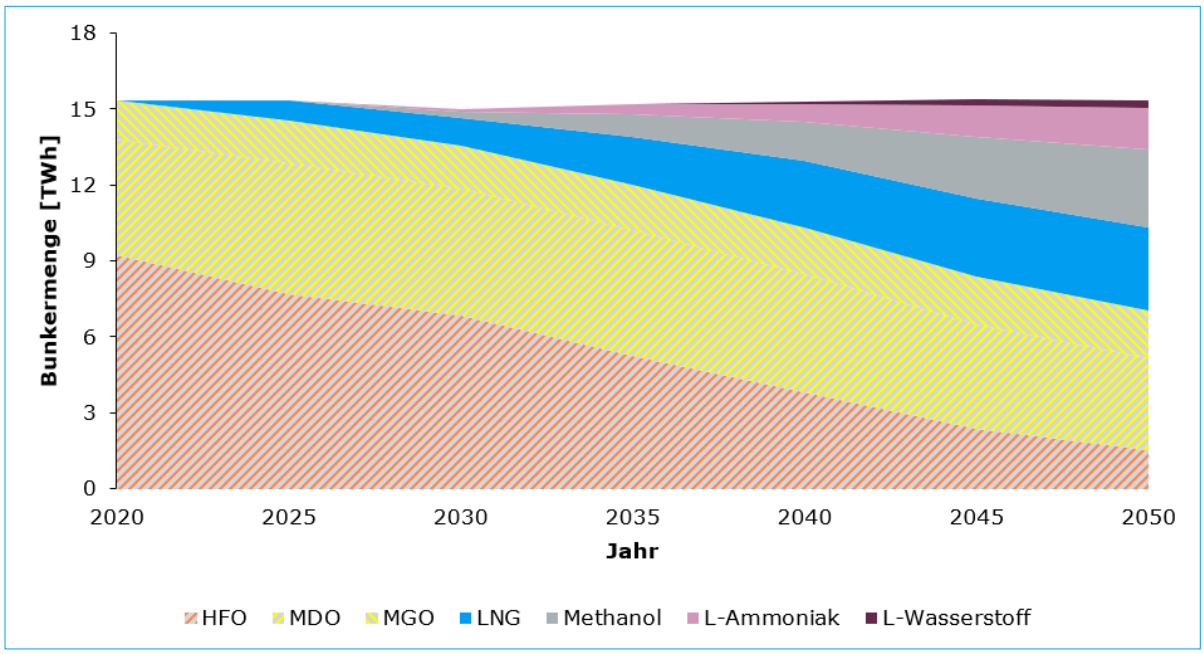


Abbildung 20 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 1A für die Hochseeschifffahrt [TWh][7]

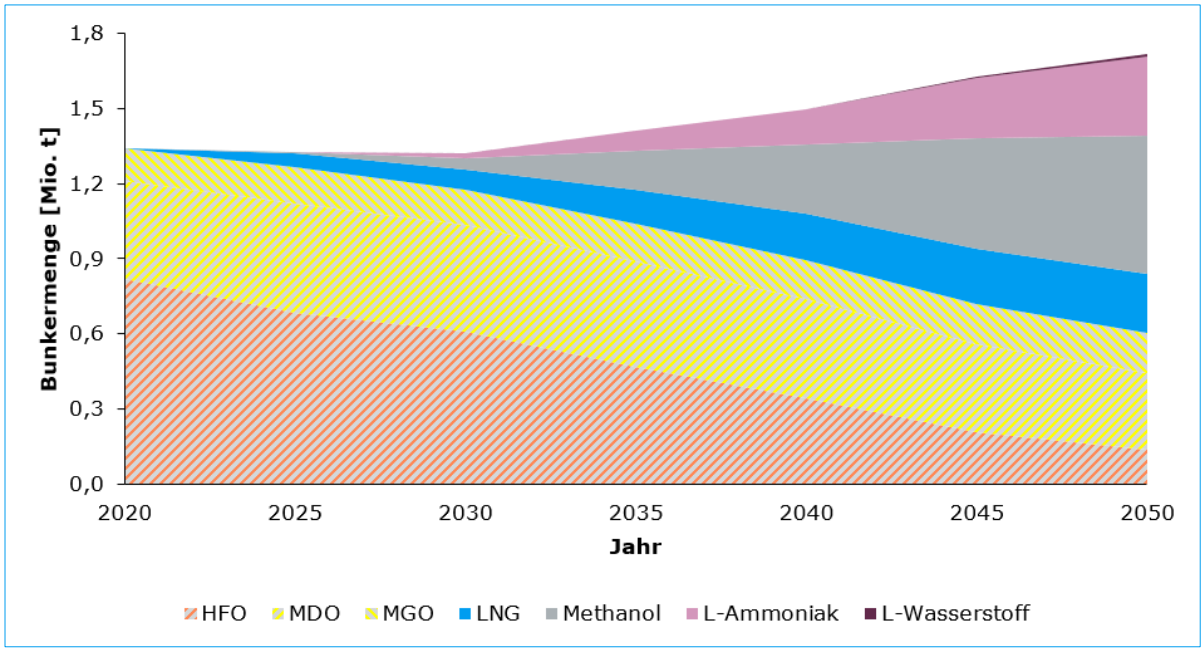


Abbildung 21 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 1A für die Hochseeschifffahrt [Mio. t][8]

Die Ergebnisse der Bedarfsermittlung für das Bunkermengenszenario 1B, das eine vollständige Defossilisierung bis 2050 bei einer Angebotsentwicklung auf heutigem Niveau zur Annahme hat, sind in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt. Ähnlich wie beim Szenario 1A wird aufgrund des konstanten Angebots eine Seitwärtsbewegung der energiebezogenen Bunkermengen

[7] Sämtliche dargestellte Kraftstoffe werden nicht nach den unterschiedlichen Gestehungspfaden differenziert.

[8] Sämtliche dargestellte Kraftstoffe werden nicht nach den unterschiedlichen Gestehungspfaden differenziert.

(Abbildung 22) verzeichnet. Die Zunahme der gewichtsbezogenen Bunkermengen fällt aufgrund der höheren Anteile alternativer Kraftstoffe mit geringerer Energiedichte hier noch höher aus. Die Kraftstoffe LNG, Methanol, Ammoniak und Wasserstoff nehmen in diesem vollständigen Defossilisierungsszenario bis zum Jahr 2050 gut 90 % der Bunkermengen ein. Es dominiert vor allem die Nachfrage nach Methanol und Ammoniak. Grund für das größere Vorhandensein von Ammoniak und auch Wasserstoff ist die gegenüber dem moderaten Defossilisierungs-Ramp-up erhöhte Defossilisierungsstrategie. Ein zügigerer Austausch nahezu der gesamten Flotte über alle Schiffssegmente hinweg ist notwendig, um dieses Ziel zu erreichen. So wird angenommen, dass auch Schiffstypen, die besonders für wasserstoff- und ammoniakbetriebene Systeme geeignet sind, vor 2050 durch entsprechende Neubauten ausgetauscht werden.

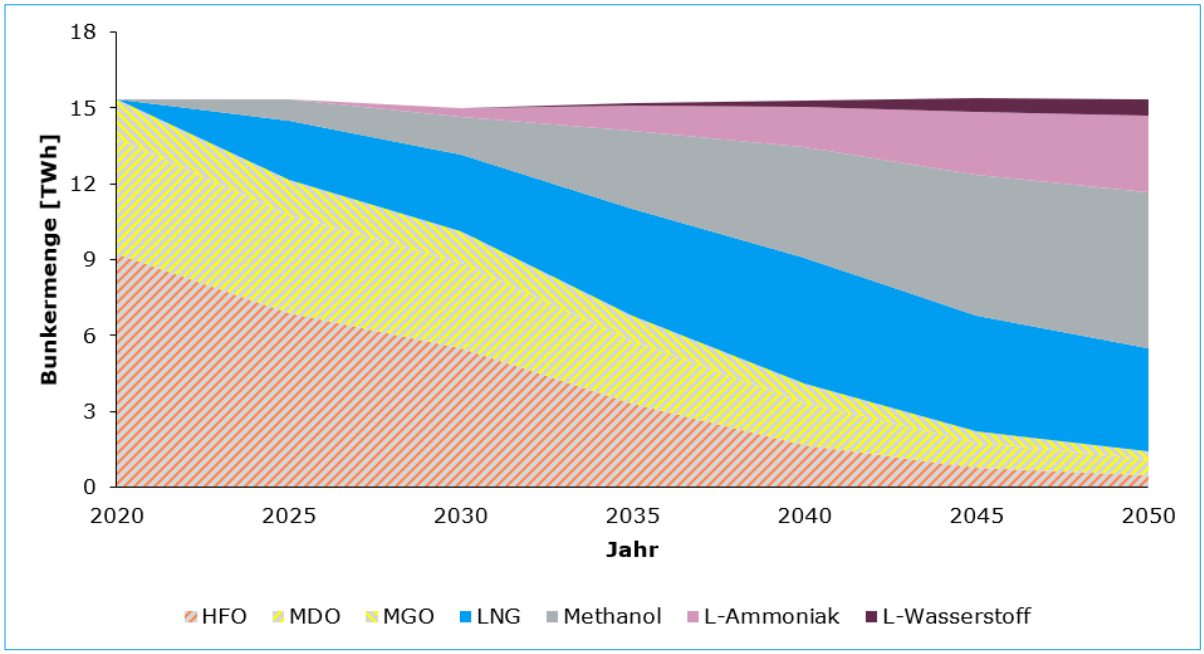


Abbildung 22 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 1B für die Hochseeschifffahrt [TWh][9]

[9] Sämtliche dargestellte Kraftstoffe werden nicht nach den unterschiedlichen Gestehungspfaden differenziert.

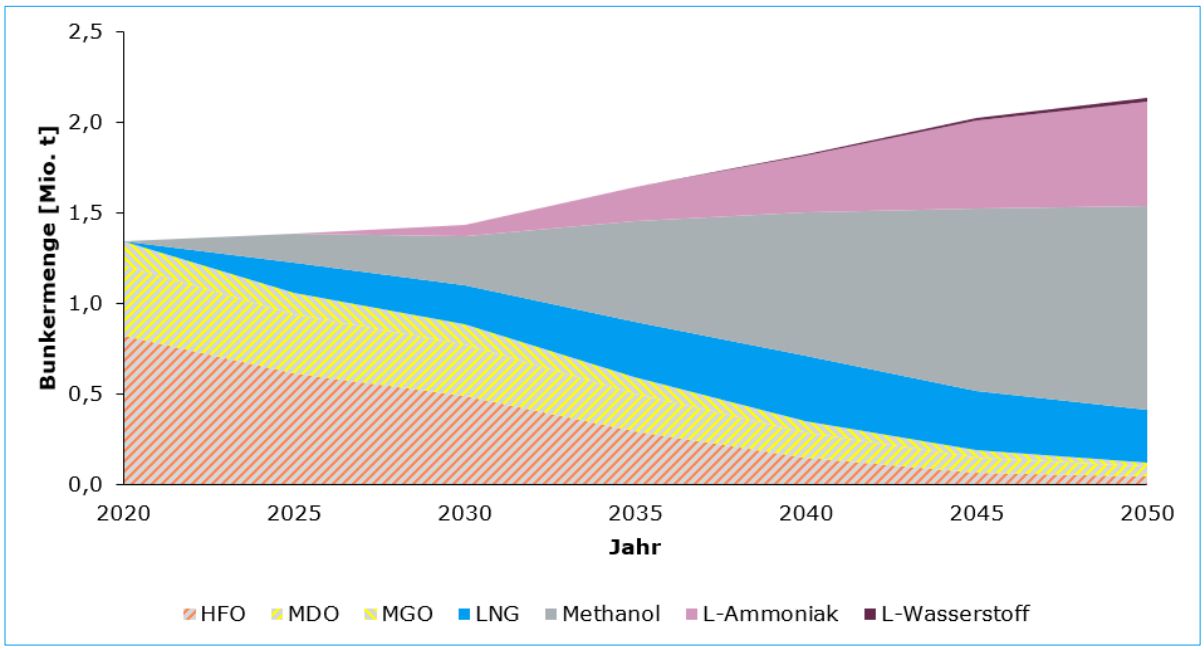


Abbildung 23 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 1B für die Hochseeschifffahrt [Mio. t][10]

Die Ergebnisse der Bedarfsermittlung für das Bunkermengenszenario 2A, das einen moderaten Ramp-up bei der Defossilisierung bis 2050 bei signifikanter Angebotsausweitung zur Annahme hat, sind in Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellt. Entsprechend der in diesem Szenario angenommenen signifikanten Angebotserweiterung der deutschen Bunkerindustrie kann ein deutlicher Anstieg sowohl der energiebezogenen als auch der gewichtsbezogenen Bunkermengen verzeichnet werden. Der Blick auf das Kraftstoffportfolio zeigt analog zum Szenario 1A (ebenfalls moderater Ramp-up bei der Defossilisierung) ab dem Jahr 2025 vor allem einen Anstieg der Kraftstoffe LNG und Methanol zu Ungunsten herkömmlicher, ölbasierter Schiffskraftstoffe. Auch hier kommt es ab dem Jahr 2030 zu einem moderaten Anstieg der nachgefragten Ammoniakmengen im Hochseebunkerbereich sowie geringen Anteilen an Wasserstoff. Insgesamt nehmen die alternativen Kraftstoffe in diesem moderaten Defossilisierungsszenario ebenfalls ungefähr 50 % des Bunkermarkts im Jahr 2050 ein.

[10] Sämtliche dargestellte Kraftstoffe werden nicht nach den unterschiedlichen Gestehungspfaden differenziert.

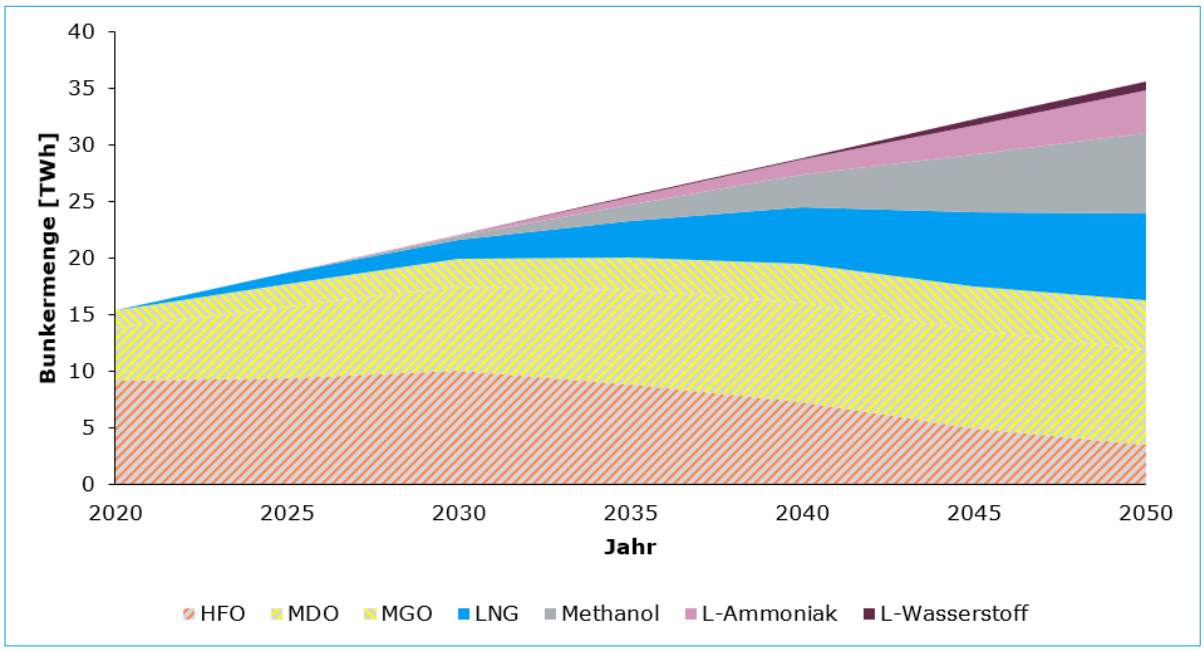


Abbildung 24 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 2A für die Hochseeschifffahrt [TWh][11]

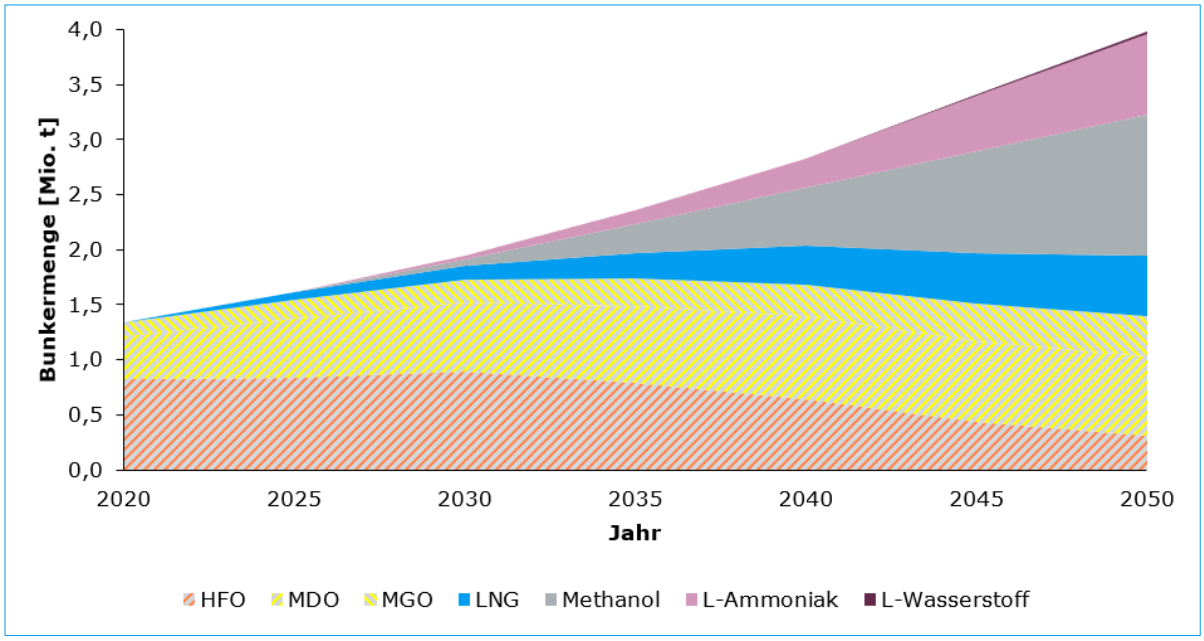


Abbildung 25 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 2A für die Hochseeschifffahrt [Mio. t][12]

Die Ergebnisse der Bedarfsermittlung für das Bunkermengenszenario 2B, das eine vollständige Defossilisierung bis 2050 bei signifikanter Angebotsausweitung zur Annahme hat, sind in Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt. Ähnlich wie beim Szenario 2A zeigt die Bunkermengenentwicklung aufgrund der signifikanten Angebotserweiterung der deutschen Bunkerindustrie ein deutliches Wachstum sowohl der energiebezogenen als auch der

[11] Sämtliche dargestellte Kraftstoffe werden nicht nach den unterschiedlichen Gestehungspfaden differenziert.

[12] Sämtliche dargestellte Kraftstoffe werden nicht nach den unterschiedlichen Gestehungspfaden differenziert.

gewichtsbezogenen Bunkermengen. Die gewichtsbezogenen Bunkermengen erhöhen sich in diesem Maximalszenario der Potenzialanalyse von ca. 1,4 Mio. t im Jahr 2050 auf ca. 5 Mio. t im Jahr 2050. Die Kraftstoffe LNG, Methanol, Ammoniak und Wasserstoff nehmen analog zum Szenario 1B bis zum Jahr 2050 mehr als 90 % der Bunkermengen ein, wobei auch hier die Nachfrage nach Methanol und Ammoniak dominiert.

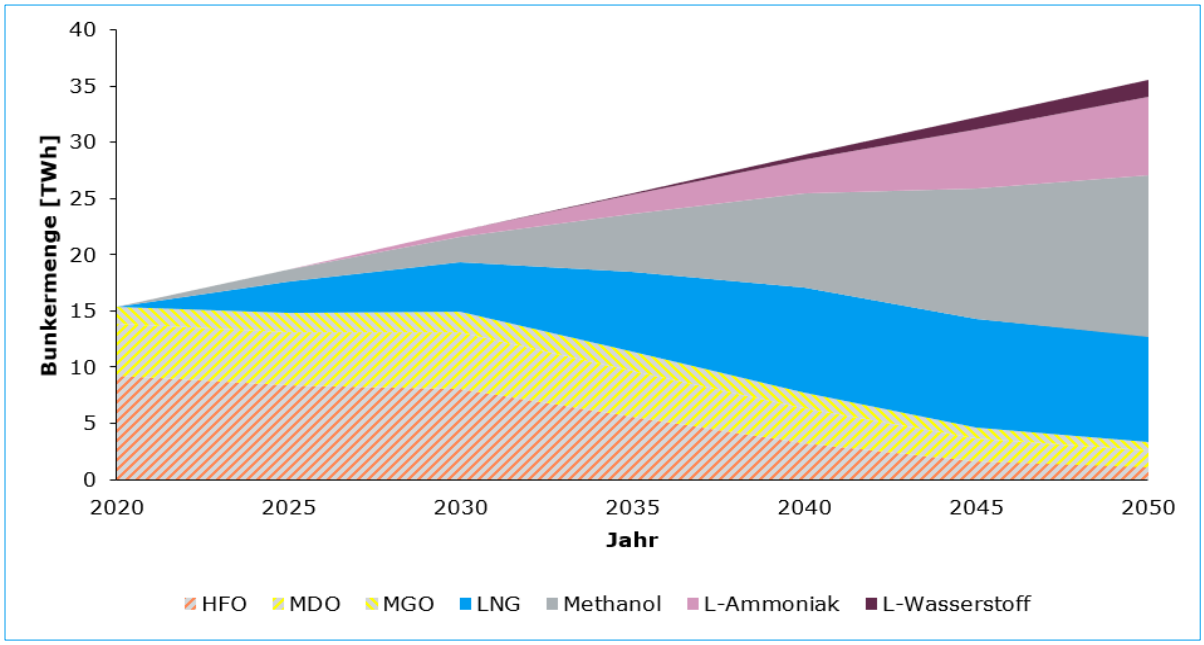


Abbildung 26 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 2B für die Hochseeschifffahrt [TWh][13]

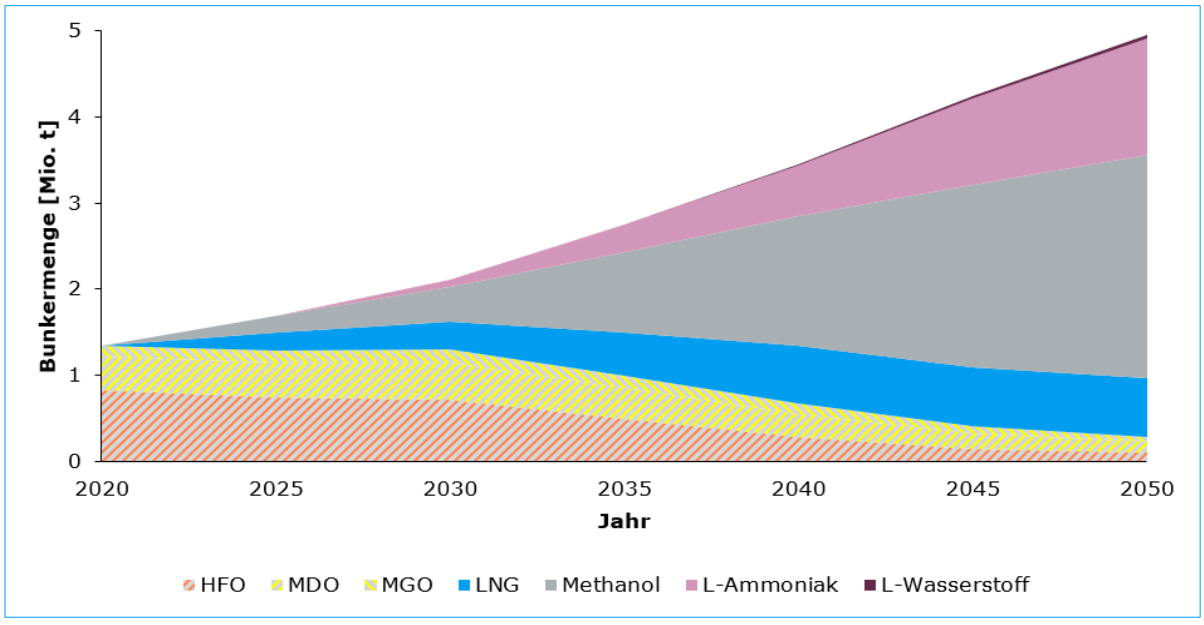


Abbildung 27 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 2B für die Hochseeschifffahrt [Mio. t][14]

[13] Sämtliche dargestellte Kraftstoffe werden nicht nach den unterschiedlichen Gestehungspfaden differenziert.

[14] Sämtliche dargestellte Kraftstoffe werden nicht nach den unterschiedlichen Gestehungspfaden differenziert.

In den 4 verschiedenen Bunkermengenszenarien wurden jeweils verschiedene Pfade der Bunkernachfrage und des Kraftstoffmixes aufgezeigt. Zur korrekten Einordnung ist darauf hinzuweisen, dass für eine vollständige Defossilisierung in der Schifffahrt, abweichend von den heutigen, nahezu ausschließlich fossilen Gestehungspfaden, die eingesetzten Energieträger fast komplett nachhaltig aus biogenen Quellen bzw. basierend auf erneuerbarem Strom produziert werden müssten. Um diesen Umstand zu würdigen, soll nachfolgend (siehe Abbildung 28) eine kurze Darstellung der Gestehungspfade in Zusammenhang mit den Bunkermengen der deutschen Hochseeschifffahrt erfolgen. Die Darstellung fußt auf den aus dem rollierenden System resultierenden nötigen Mengenanteilen alternativ erzeugter Kraftstoffe. Dabei wurde der den Kraftstoffoptionen zugrunde gelegte Blend (anteiliger Mix aus nachhaltigen Drop-in- und fossil erzeugten Kraftstoffen) übergreifend entsprechend dem aus den Regularien resultierenden nötigen Anteil alternativer Kraftstoffe umgelegt, um die Defossilisierungsziele erreichen zu können (siehe Kapitel 4.2).

Für die alternativen Kraftstoffe wurde keine dezidierte Unterscheidung der Gestehung (biogen, strombasiert/renewable fuels of non-biological origin) vorgenommen, da eine solche Darstellung die gebotene Komplexität des rollierenden Systems übersteigt.

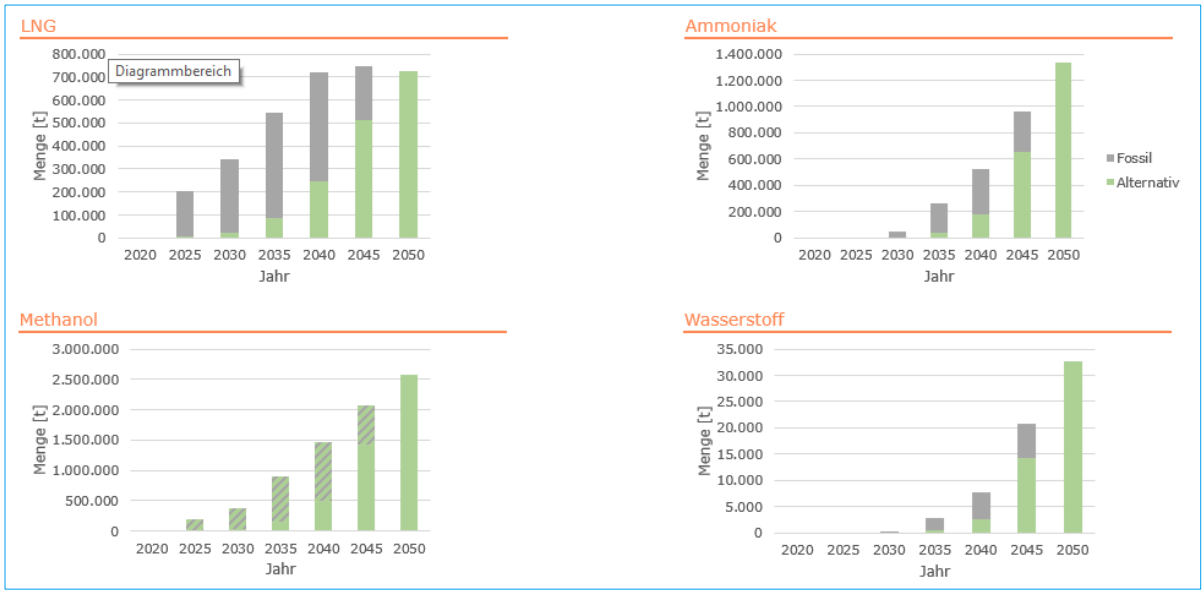


Abbildung 28 | Hochlauf der absoluten Anteile [t] erneuerbar erzeugter Kraftstoffe (biogen, strombasiert/renewable fuels of non-biological origin) an der Gesamtnachfragemenge alternativer Kraftstoffe 2020–2050

Gerade in den Jahren 2025 bis 2040 ist zu erwarten, dass auf Basis fossiler Energiegewinnung erzeugte Versionen der alternativen Kraftstoffe LNG, Methanol, Ammoniak und Wasserstoff als Starthilfe für die Marktetablierung dienen, da die Gestehungspfade für diese Kraftstoffe bereits vorhanden und kurzfristig verfügbar sind.

Für die Umsetzung der Defossilisierungsziele ist eine schrittweise Erhöhung der regenerativ erzeugten Kraftstoffe notwendig. Über alle dargestellten Kraftstoffe hinweg ist dementsprechend ein signifikanter Anstieg der Abnahmemenge für Schiffsbunker alternativ erzeugter Kraftstoffe im Defossilisierungsszenario 2B angenommen.

Insbesondere Aussagen über die Rolle und den zukünftigen Anteil von grauem Methanol zu treffen, ist jedoch mit hohen Unsicherheiten verbunden.

Maßgeblichen Einfluss hat hier, ob zukünftig ein Well-to-Wake- oder Tank-to-Wake-Ansatz für die Bemessung der ausgestoßenen Schiffsemissionen regulatorisch verankert wird. Bei Letzterem weichen die ausgestoßenen Emissionen von (auf Erdgasbasis erzeugtem) grauen Methanol nur leicht von denen herkömmlicher fossiler ölbasierter Kraftstoffe ab. Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, sind sie als deutlich höher einzustufen. Sollten zu den Regularien zusätzlich lokale Emissionsbeschränkungen hinzukommen, ist dies als verstärkender Faktor für den zunehmenden Einsatz nachhaltig erzeugten Methanols zu werten.

Gerade im Jahr 2023 war eine zunehmende preisliche Annäherung von Methanol an HFO am europäischen (Bunker-)Markt zu verzeichnen. Eine Fortschreibung dieses Trends würde den vermehrten Einsatz grauen Methanols begünstigen. Eine gegenteilige Entwicklung ist zu erwarten, sollte sich der Trend als rückläufig erweisen und graues Methanol erneut teurer werden oder/und sollten Anreize geschaffen werden, grünes Methanol preislich attraktiv zu gestalten.

Da weder die jüngste Preisentwicklung grauen Methanols noch seine Emissionen als ausreichend nachteilig bewertet werden können, um diese Kraftstoffoption (vor allem im Einsatz als Blend) gänzlich auszuschließen, und auch eine ausreichende Bestandsentwicklung für Methanol-Bunkerstrukturen sichergestellt werden soll, wird es weiterhin in den Szenarien berücksichtigt. Die Entwicklung der Anteile grauen und grünen Kraftstoffs an der gesamten Menge des verbunkerten Methanols wird jedoch im Split mit höherer Flexibilität angenommen als für andere Kraftstoffoptionen.

Binnenschifffahrt

Für die Binnenschifffahrt wurde entsprechend Kapitel 4.2 lediglich ein 100%-Defossilisierungsszenario (Mannheimer Erklärung) in Betracht gezogen. Die THG-Reduktionsziele wurden äquivalent auf die avisierten CO_2-Einsparungen übertragen. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird das 100%-Defossilisierungsszenario fokussiert, da beide Szenarien sich aufgrund der geringen Daten zu weiteren Stützjahren für unterschiedliche Entwicklungen nur sehr gering unterscheiden würden.

Eine sich ändernde Beeinflussung der Bunkernachfrage im Binnenschifffahrtsbereich durch die neu entstehenden Hubs für alternative Energieträger an der Küste ist nicht zu erwarten, da der wichtigste Bunkermarkt für die reine Binnenschifffahrt – das Rhein-Ruhr-Gebiet – in Nordrhein-Westfalen zu verorten ist (siehe Kapitel 3.3). Die Bunkernachfrage der Küsten- und Binnenschifffahrt in den Bundesländern mit Zugang zur Küste und großen Überseehäfen ist vor allem auf die Küsten- und Binnenschifffahrt zurückzuführen, die bereits heute durch die dort verorteten Hubs versorgt werden.

Grundlage der kalkulierten indikativen Bunkerbedarfe der Binnenschifffahrt ist eine starke Verlagerung der Branche auf (L-/C-)NG- und methanolbetriebene Schiffe. Für LNG sind Tank- und Antriebssysteme bereits heute teilweise erprobt sowie stark vereinzelt auf Binnenschiffen in Europa verbaut.[15] Da auf der Sitzung des Europäischen Ausschusses zur Ausarbeitung von Standards im Bereich der Binnenschifffahrt (CESNI) im Oktober 2023 bereits ein Entwurf mit

[15] Siehe z. B.: Ecotanker II und Ecotanker III: Reederei Interstream, niederländische Flagge, wurden 2013 und 2014 von Shell unter den Namen „Greenstream" und „Greenrhine" in Betrieb genommen.

„Blue Marjan": von Shell gechartert, niederländische Flagge, 2022 fertiggestellt, Schiffsentwurf „Parsival"-Design von Damen mit LNG-betriebenen Gasmotoren, weitere Schiffe folgen.

LNG BINNENVAART Deployment in Inland Waterway Transport Konsortium: stattete insgesamt 3 Binnenschiffe als Pilotprojekte mit LNG-Retrofits aus („Werkendam" , „Somtrans LNG", „Argonom") + Entwicklung und Etablierung einer Bunkerstation.

Vorschriften für die Lagerung und Nutzung von Methanol an Bord von Binnenschiffen vorgestellt wurde, ist mit einer zeitnahen regulatorischen Wegbereitung für Methanol zu rechnen. Sollte dies der Fall sein, kann aufgrund der technologisch bereits etablierten Antriebssysteme ein weitläufiger Anstieg der Methanolflotte erfolgen.

Die Szenarioentwicklung implementiert die Annahme, dass die Kraftstoffe Ammoniak und Wasserstoff lediglich eine untergeordnete Rolle bei der Defossilisierung der deutschen Binnenschifffahrt spielen werden. Gerade für Ammoniak ist mit erheblichen Hemmnissen aufgrund der Festsetzung eines angebrachten und allgemein akzeptierten Sicherheitsniveaus, vor allem bei der Durchfahrt durch dicht besiedelte Gebiete, zu rechnen. Auch die technologische Entwicklung von kommerziell nutzbaren Antriebssystemen wird voraussichtlich noch einige Jahre in Anspruch nehmen. Es ist zu empfehlen, geltende und nötige Sicherheitsbestimmungen für den Einsatz von Ammoniak als Kraftstoff in der Binnenschifffahrt in weiterführenden Analysen zu forcieren, um die mögliche Rolle Ammoniaks präziser einschätzen zu können.

Für wasserstoffbetriebene Binnenschiffe befinden sich in Europa bereits sehr vereinzelte Pilotprojekte in der Erprobung. Diese setzen u. a., wie z. B. bei dem in Deutschland beheimateten Projekt „ELEKTRA" der TU Berlin (siehe Kapitel 3.4) und der BEHALA, auf Tanksysteme in Form von Wechselbehältern.[16] Die Wechselbehälter könnten perspektivisch an fest verorteten Landstationen getauscht werden. Die jedoch ohnehin bereits begrenzten volumetrischen Laderaumverfügbarkeiten an Bord von Binnenschiffen stehen einer solchen Entwicklung voraussichtlich entgegen, da die Wechselbehälter platzintensiv sind. Hinzu kommen zunehmende Niedrigwasserproblematiken, die die gewichtsmäßige Beladungsgrenze von Binnenschiffen zusätzlich einschränken und den Einsatz schwerer Tankbehälter schwierig machen. Kraftstoffe mit einer möglichst hohen Energiedichte sowie optimal eingepassten und nach Möglichkeit leichten Tanksystemen gewinnen daher an Attraktivität. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird das Wechselbehältersystem folglich als Nischentechnologie bewertet.

Da die Datengrundlage für Projekte, Technologien und Ausbaustufen alternativer Antriebe in der Binnenschifffahrt sehr gering ist und kaum öffentlich zugängliche Datenbanken zur Verfügung stehen, die z. B. die aktuelle und georderte Flotte hinsichtlich ihrer Bunkereigenschaften spezifizieren, ist die genaue Entwicklung nicht vorauszusehen (siehe Kapitel 3.5).

Die nachstehend dargestellten Bunkermengen und Szenarien sind entsprechend als Einordnung auf Basis des aktuellen Wissensstandes zu verstehen. Abweichende Entwicklungen, sowohl bei den Nachfragemengen als auch hinsichtlich der Verteilung auf die einzelnen Kraftstoffe, sind wahrscheinlich.

[16] Siehe z. B. BEHALA: Das Schubboot mit ganz neuem Energie-System, https://www.behala.de/elektra/.

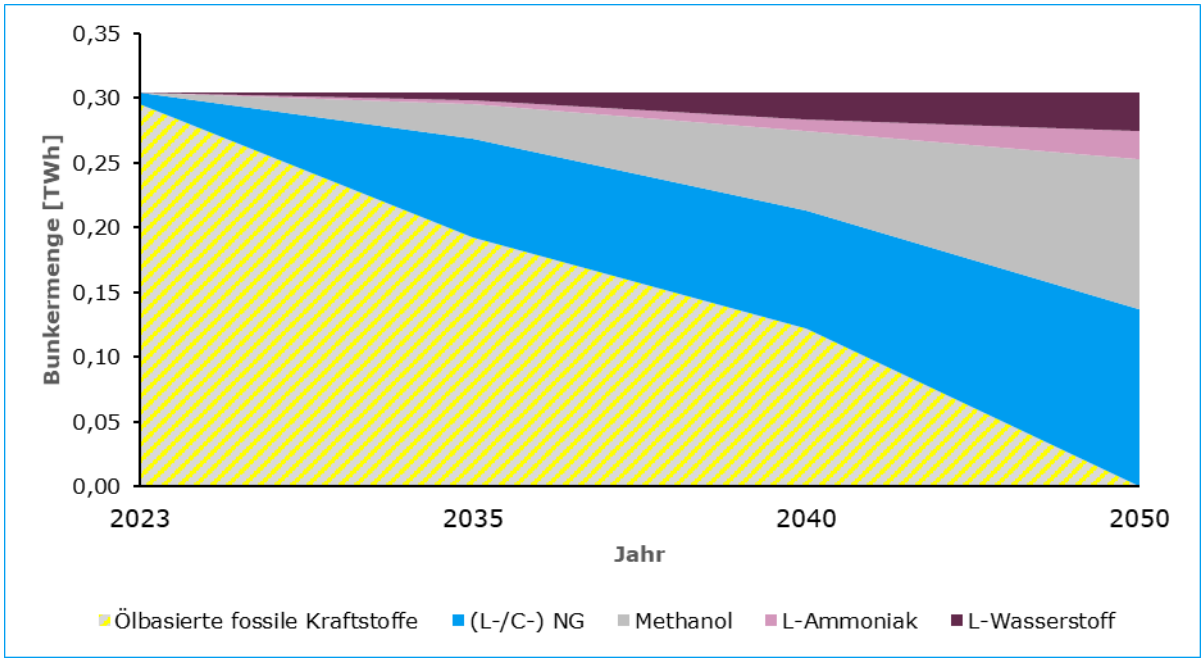


Abbildung 29 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 100%-Defossilisierung für die Küsten- und Binnenschifffahrt [TWh][17]

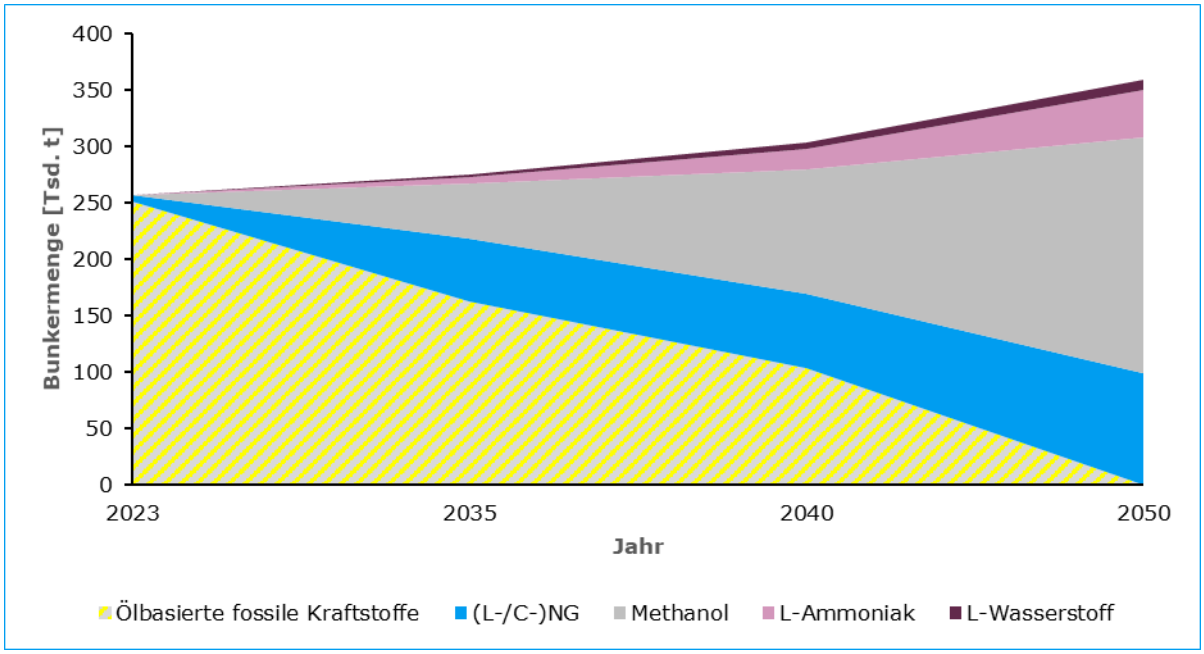


Abbildung 30 | Ergebnisse des Bunkermengenszenarios 100%-Defossilisierung für die Küsten- und Binnenschifffahrt [Tsd. t][18]

Da im Rahmen der Studie eine gleichbleibende Nachfragemenge bis zum Jahr 2050 angenommen wird, zeigt die kumulierte Bunkermenge über die nachgefragten TWh (Abbildung 29) keine

[17] NG = Natural Gas besitzt in diesem Fall Methan als Hauptkomponente. Üblicherweise kann der Methangehalt bei NG zwischen 75 und 98 % liegen [27].

[18] NG = Natural Gas besitzt in diesem Fall Methan als Hauptkomponente. Üblicherweise kann der Methangehalt bei NG zwischen 75 und 98 % liegen [27].

Veränderungen. In dem Szenario wird der Ramp-up der alternativen Kraftstoffe vor allem über (L-/C-)NG und Methanol realisiert. Diesen kommt im Jahr 2050 ein Anteil an der insgesamt nachgefragten Energiemenge von mehr als 80 % im 100%-Szenario zu.

Den Darstellungen der indikativen Bunkermengen in Tsd. t (Abbildung 30) ist zu entnehmen, dass die gravimetrisch benötigte Menge an Methanol im Jahr 2050 in dem dargestellten Szenario mit Abstand den größten Anteil einnimmt – aufgrund der geringeren gravimetrischen Energiedichte von Methanol im Vergleich zu LNG und um eine ausreichende Defossilisierung zu erzielen.

Insgesamt ist für das Bunkermengenszenario der Binnenschifffahrt festzuhalten, dass auf Basis der im Rahmen des Szenarios getroffenen Annahmen und der verfügbaren Datengrundlagen ein Anstieg der insgesamt benötigten Bunkermenge im Jahr 2050 von ungefähr 100.000 t pro Jahr kalkuliert wurde. Die steigende Bunkermenge bei gleichbleibender energetischer Nachfrage ist auf die geringeren gravimetrischen Energiedichten einiger alternativer Kraftstoffe, die in dem Szenario stark nachgefragt werden, im Vergleich zu den herkömmlichen Kraftstoffen zurückzuführen.

Die Abnahmemenge an Bunkern der Binnenschifffahrt ist im Vergleich zur Seeschifffahrt gering und das durchschnittliche Alter der deutschen Binnenschifffahrtsflotte ist mit rund 48 Jahren hoch. Zudem sind Binnenschifffahrtsreedereien häufig (familiengeführte) kleine bis mittelständische Unternehmen. Daher ist ein schneller Austausch der Flotte nicht zu erwarten. Es ist als weiteres mögliches Entwicklungsszenario daher denkbar, dass in diesem Schifffahrtssegment verstärkt auf synthetisch erzeugte etablierte Kraftstoffe gesetzt wird (synthetischer Diesel), um trotz eines langsameren Flottenaustauschs und damit auch einer langsameren Ersetzung bestehender Antriebssysteme eine Reduktion der Treibhausgasemissionen zu erreichen und das kurz- und mittelfristig nötige Investitionsvolumen für die Reedereien zu begrenzen.

5 BUNKERKONZEPTE UND AUSBAUSTUFEN FÜR BUNKERSTRUKTUR

5.1 Methodik

Das 3. Arbeitspaket bündelt die Ergebnisse der Arbeitspakete 1 und 2 mit dem Ziel, aus den szenarienbasierten Bedarfen Bunkerstrukturkonzepte abzuleiten. Das Arbeitspaket gliedert sich in die nachfolgend dargestellten 3 Arbeitsschritte:

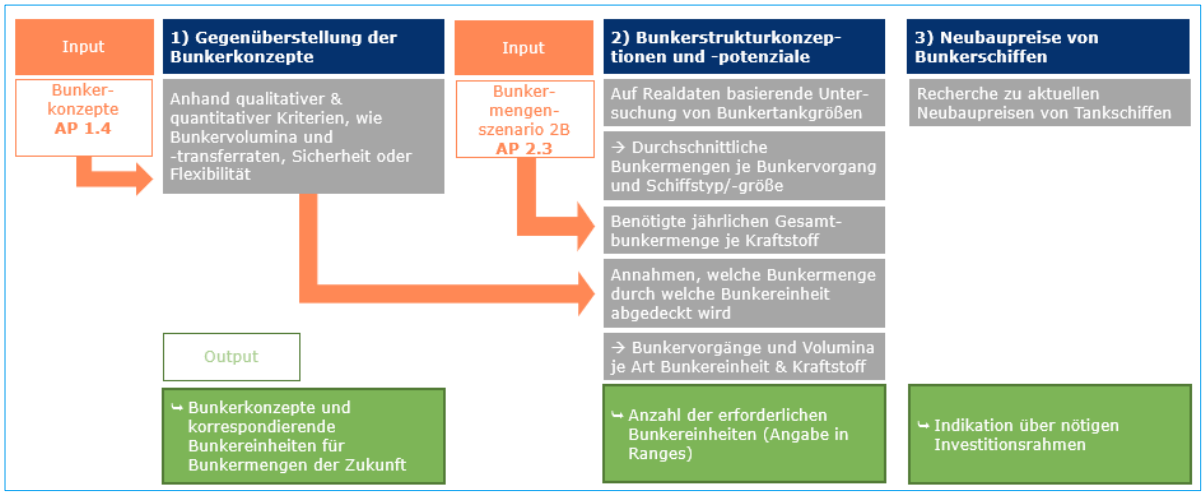


Abbildung 31 | Methodik AP 3 – chronologische Arbeitsschritte 1), 2), 3), Input & Ergebnisoutput

Gegenüberstellung der Bunkerkonzepte

Zu Beginn werden die in Kapitel 3.4 vorgestellten Bunkerkonzepte mittels verschiedener Kriterien, wie z. B. gängiger Bunkervolumina und -transferraten, Sicherheit oder Flexibilität, qualitativ und quantitativ gegenübergestellt. Ziel ist es, eine begründete Annahme treffen zu können, durch welche Bunkerkonzepte und korrespondierende Bunkereinheiten die in Kapitel 4.3 ermittelten Bunkermengen in Zukunft bedient werden. Dies hat unmittelbaren Einfluss auf die anschließende Gestaltung der Bunkerstrukturkonzeptionen.

Bunkerstrukturkonzeptionen und -potenziale

Die Grundlage für die Erarbeitung der Bunkerstrukturkonzeptionen bildet das Bunkermengenszenario 2B aus dem Kapitel 4.3. Um auf Basis der Bunkermengen der einzelnen Schiffstypen, -größenklassen und Kraftstoffe die erwarteten Bunkervorgänge ermitteln zu können, wird zunächst eine auf Realdaten basierende Untersuchung potenzieller Bunkertankgrößen angestellt. Anhand dieser können durchschnittliche Bunkermengen je Bunkervorgang für jeden Schiffstyp und die entsprechende Größe des Schiffes abgeleitet werden.

Die Bunkermengen werden im Anschluss auf die durchschnittlichen Bunkermengen je Bunkervorgang umgelegt und auf diese Weise wird eine Gesamtanzahl an Bunkervorgängen zur Bedienung der Nachfrage abgeleitet. Parallel werden auf Basis der Ergebnisse des Kapitels 5.2 Annahmen getroffen, welche Bunkermengen durch welche Art von Bunkereinheit (Tankwagen, Bunkerschiff etc.) abgedeckt werden. Bei den Bunkerschiffen werden hier explizit verschiedene Schiffsgrößen berücksichtigt. Nachfolgend lassen sich so die durch die jeweilige Bunkereinheit zu leistende Anzahl an Bunkervorgängen und die entsprechenden Volumina ermitteln. Diese

Kennzahl wird abschließend genutzt, um die Anzahl der erforderlichen Bunkereinheiten abschätzen zu können (Angabe in Ranges).

Die in der Aufstellung der Bunkermengenszenarien berücksichtigte Unterteilung in Nord- und Ostsee (entsprechend den Anlaufzahlen und Schiffsgrößen aus den Eurostat-Datensätzen) wird im Rahmen der Aufstellung der Bunkerstrukturkonzeptionen genutzt, um die Potenziale für Bunkerstruktur auch regional zu segregieren. Die notwendigen Bunkereinheiten in den Stützjahren 2030, 2040 und 2050 werden mit Hilfe von Karten, die auch die (bisher) bekannten und geplanten Importterminalinfrastrukturen in Deutschland für verschiedene Energieträger enthalten, dargestellt. Ebenso werden die potenziellen Beziehungen in der Versorgung der Hochseeschifffahrt mit Bunkermengen der relevanten Kraftstoffe im Stile eines Hub-and-Spoke-Systems dargestellt.

Neubaupreise von Bunkerschiffen

Um eine Indikation für die Neubaupreise von Bunkerschiffen zu entwickeln und somit auch einen möglichen Investitionsrahmen für die in Kapitel 0 ermittelten Bunkereinheiten bestimmen zu können, werden auf Basis heutiger Neubaupreise bei Tankschiffen der entsprechenden Energieträger potenzielle Preise für Bunkerschiffe aufgezeigt.

5.2 Gegenüberstellung der Bunkerkonzepte

Die in Kapitel 3.4 dargestellten Bunkerkonzepte eignen sich für unterschiedliche Anwendungsbereiche besonders. Ausschlaggebend sind hier neben der geforderten örtlichen Flexibilität der Bunkervorgänge vor allem die Menge, die je Bunkervorgang abgefragt werden kann, und die Frequenz, in der die Bunkereinheit Bebunkerungen durchführt. Abbildung 32 veranschaulicht, welches Bunkerkonzept für welche Art von Einsatzgebiet und welche Anzahl von Bunkervorgängen als besonders geeignet einzustufen ist.

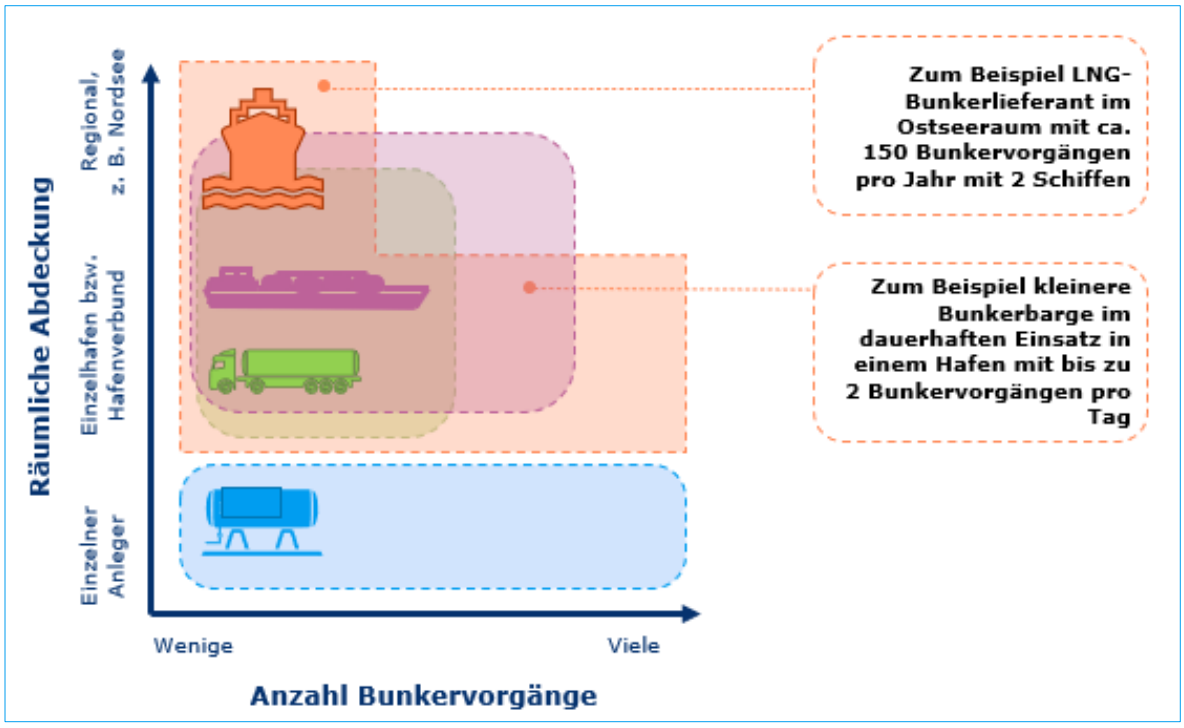


Abbildung 32 | Indikation zu Anwendungsgebiet und Mengenabdeckung verschiedener Bunkerkonzepte

Aufgrund des großen potenziellen Bereitstellungsvolumens ist eine Ship-to-Ship-Bebunkerung oder in etwas kleinerem Maßstab auch Barge-to-Ship-Bebunkerung dort geeignet, wo viele jährliche Bunkervorgänge mit großen Einzelabnahmemengen zu erwarten sind. Die Bunkerschiffe können lange Strecken zurücklegen und decken daher teilweise große Gebiete, wie z. B. die Nordseeküstenregion, ab. Bunkerbargen verbleiben tendenziell eher in einzelnen Hafengebieten/Gewässerabschnitten.

Der Einsatz von Trucks als Bunkereinheiten weist zwar den Vorteil einer hohen örtlichen Flexibilität auf und es können große räumliche Distanzen durch die Trucks überwunden werden. Jedoch ist die Menge an Bunkergut, die durch Trucks bereitgestellt werden kann, sehr begrenzt, sodass sie nur für eine geringe Anzahl an Bunkervorgängen geeignet sind.

Port-to-Ship-Bunkerstrukturen sind geeignet, eine Vielzahl von Bunkervorgängen mit unterschiedlichen Bedarfsmengen (auch sehr große) abzudecken. Da sie an einem Anleger fest installiert sind, weisen sie keine räumliche Flexibilität auf.

Die typischen Eigenschaften der einzelnen Bunkerkonzepte sowie für sie gängige Bunkervolumina und Transferraten sind nachfolgend gelistet:

Bunker-konzept	Gängige Bunkervolumina (V) und Transferraten (Q)	Vorteile	Nachteile
TtS	V ≤ 250 m^3 Q ≈ 40–60 m^3/h	▪ Geringe Anforderungen an bestehende (Hafen-) Infrastruktur ▪ Vergleichsweise weniger aufwendige Anpassung von Sicherheitsmaßnahmen ▪ Operative Flexibilität bspw. bezüglich des Belieferungshafens und auch bei Volumina, z. B. durch Multi-Truck-Bebunkerungen	▪ Vergleichsweise geringe Bunkermengen und Transferraten ▪ Einschränkungen von SIMOPS durch landseitige Sicherheitsmaßnahmen
StS	V ≈ 200–18.600 m^3 Q ≈ 100–1.000 m^3/h	▪ Vergleichsweise hohe Bunkermengen und Transferraten ▪ Operative Flexibilität z. B. bezüglich des Orts der Bebunkerung ▪ Gute Eignung für SIMOPS aufgrund räumlicher Trennung	▪ Zusätzliche/verschärfte Sicherheitsanforderungen aufgrund der seeseitigen Ein- und Auswirkungen
PtS	Terminal: V ≈ 2.000–250.000 m^3 Q ≈ 1.000–2.000 m^3/h Bunkerstationen: V ≈ 100–3.500 m^3 Q ≈ 50–500 m^3/h	▪ Möglichkeit großer Bunkermengen und Transferraten ▪ Sichere und verlässliche Lösung in ortsfestem, wenigen Veränderungen unterworfenem Umfeld	▪ Starke Einschränkung der operativen Flexibilität durch Bindung an einen festen Ort der Kraftstoffübergabe, der in der Regel nicht dem regulären Liegeplatz eines Schiffes im Hafen entspricht (Wegfall SIMOPS, zusätzlicher Anlauf)

Tabelle 8 | Gegenüberstellung der Bunkerkonzepte anhand typischer Eigenschaften

5.3 Bunkerstrukturkonzeptionen und -potenziale

Seeschifffahrt

Um dem Ziel der Studie, Potenziale des Aufbaus von Bunkerstrukturen für alternative Schiffskraftstoffe zu identifizieren, gerecht zu werden, wird für die Aufstellung der Bunkerstrukturkonzeptionen das Bunkermengenszenario 2B unter Annahme einer vollständigen Defossilisierung und einer signifikanten Angebotsausweitung auf dem deutschen Bunkermarkt angewendet.

Die Bunkerstrukturkonzeption fußt auf einer Zuteilung der Bunkerkonzepte zu Mengenbereichen für die durch sie abzudeckenden Bunkerkapazitäten. Diese Zuteilung wird für die einzelnen alternativen Kraftstoffe vorgenommen. Grundlage der Zuteilung ist eine Recherche typischer Tankvolumina unter Einbeziehung der spezifischen volumetrischen Energiedichten und Tankeigenschaften.

Kraftstoff	Bunkereinheit	Bunkerkapazität [m^3]	Mindest-bunkermenge [m^3]	Maximal-bunkermenge [m^3]
LNG	Tankwagen	53	0	150
	Kleines Bunkerschiff	1.500	151	1.500
	Mittleres Bunkerschiff	4.000	1.501	4.000
	Großes Bunkerschiff	8.000	4.001	8.000
	Sehr großes Bunkerschiff	20.000	8.001	20.000
Methanol	Tankwagen	34	0	150
	Kleines Bunkerschiff	1.500	151	1.500
	Mittleres Bunkerschiff	4.500	1.501	4.500
	Großes Bunkerschiff	9.000	4.501	9.000
	Sehr großes Bunkerschiff	22.000	9.001	22.000
Ammoniak	Tankwagen	37	0	150
	Kleines Bunkerschiff	1.500	151	1.500
	Mittleres Bunkerschiff	4.000	1.501	4.000
	Großes Bunkerschiff	8.000	4.001	8.000
	Sehr großes Bunkerschiff	20.000	8.001	20.000
L-Wasserstoff	Tankwagen	53	0	150
	Kleines Bunkerschiff	1.000	151	1.000
	Mittleres Bunkerschiff	3.000	1.001	3.000
	Großes Bunkerschiff	6.500	3.001	6.500
	Sehr großes Bunkerschiff	16.000	6.501	16.000

Tabelle 9 | Größe und Zuteilung der Bunkereinheiten nach alternativen Kraftstoffen

Um die Bunkerkapazitäten für die einzelnen Typen der Bunkereinheiten und zukünftigen Kraftstoffoptionen auf die Bunkerbedarfe der Jahre 2030, 2040 und 2050 umzulegen, werden die in Kapitel 3.3 erarbeiteten Gesamtbunkermengen der einzelnen Kraftstoffe und die Bunkermengen der Schiffstypen in die resultierenden benötigten Bunkervorgänge für die Nord- und Ostsee überführt (siehe).

Grundlage bilden hier u. a. die antizipierte Entwicklung von durch die einzelnen Schiffssegmente und Schiffsgrößenklassen durchschnittlich je Bunkervorgang abgenommenen Bunkermengen. Es ist zu erwarten, dass bei der Nutzung alternativer Kraftstoffe tendenziell geringere energetische Bunkermengen in den Bunkertanks Platz finden. Diese Entwicklung variiert je nach gewähltem Kraftstoff und ist entsprechend in der Berechnung der benötigten Bunkervorgänge je Kraftstoff eingepreist. Zukünftige alternative Designansätze für Bunkertanks an Bord sind in der Bewertung der Entwicklung der verbunkerten Einzelmengen nicht berücksichtigt.

Für die weiteren Kalkulationsschritte wurden die Bunkermengen in Kubikmetern und Tonnen berechnet, um anschließend die Anzahl der benötigten Bunkervorgänge pro Kraftstoff – aufgeteilt hinsichtlich Nord- und Ostsee – zu ermitteln. Hierzu wurde die Bunkermenge mit der unterstellten Bunkermenge je Vorgang in Kubikmetern dividiert. Die eingegebenen Parameter für die Berechnung der Anzahl der Bunkervorgänge wird in Abbildung 33 schematisch dargestellt.

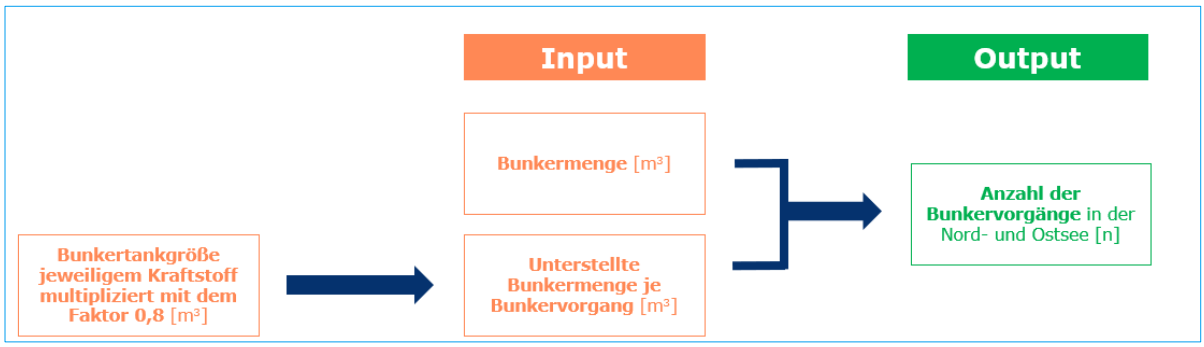


Abbildung 33 | Vorgehen Ermittlung der Bunkermengen Vorgänge Nord- und Ostsee

Die Anzahl der ermittelten Tankvorgänge wurde anschließend für die alternativen Kraftstoffe jeweils nach den benötigten Bunkervolumina geclustert und entsprechend den Volumina aus Tabelle 9 auf die Bunkereinheiten verteilt. Daraus resultierend konnte für die Jahre 2030, 2040 und 2050 für die Nord- und Ostsee die Anzahl der benötigten Bunkereinheiten festgestellt werden (siehe Tabelle 10).

Größe	Kraftstoff	Bunkermenge [t]			Bunkermenge [m³]			Anzahl Bunkervorgänge [n]		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Insgesamt - Nordsee	IFO	485.958	144.920	25.787	490.866	146.384	26.047	844	654	488
	MDO	268.288	140.117	61.978	298.097	155.686	68.865	580	549	451
	MGO	97.671	64.525	33.436	108.523	71.694	37.151	208	209	176
	LNG	135.356	365.173	387.855	300.792	811.496	861.900	3.921	5.415	6.479
	Methanol	186.812	926.622	1.558.609	235.874	1.169.977	1.967.941	1.437	2.700	4.347
	Ammoniak	64.785	481.659	916.026	92.550	688.084	1.308.608	93	379	889
	L-Wasserstoff	507	8.874	25.559	7.139	124.980	359.979	37	513	1.809
Insgesamt - Ostsee	IFO	235.930	138.453	75.815	238.313	139.851	76.580	470	251	63
	MDO	153.844	125.491	63.291	170.937	139.434	70.324	406	222	74
	MGO	59.269	54.327	24.718	65.854	60.363	27.464	151	100	29
	LNG	184.485	311.852	290.894	409.966	693.005	646.431	5.236	4.815	5.133
	Methanol	215.445	573.445	1.037.348	272.027	724.047	1.309.783	1.242	1.460	2.779
	Ammoniak	26.053	102.464	429.813	37.218	146.377	614.018	49	143	1.281
	L-Wasserstoff	276	3.614	21.311	3.891	50.899	300.162	17	187	1.939

Tabelle 10 | Ermittelte Bunkermengen und -vorgänge alternativer Kraftstoffe in Nord- und Ostsee

Die Bunkervorgänge nach Bunkereinheit wurden mit der Mindestkapazität der Bunkereinheit dividiert, um die Anzahl der Bunkereinheiten zu erhalten. Dabei wurde von den in Tabelle 11 folgenden möglichen Bunkervorgängen je Einheit ausgegangen:

Größe Bunkerschiff		Antizipierte durchschnittliche Anzahl Bunkervorgänge/Einheit	Kommentar
Klein	LNG ≤ 1.500 m^3	300	Es ist mit einem vermehrten Bedarf an kleinen Bunkereinheiten zu rechnen, da zukünftig von einem deutlich größeren angebotenen Produktportfolio auszugehen ist (aktuell nahezu ausschließlich 2 Kraftstoffoptionen für die Seeschifffahrt). Begrenzter Aktionsradius (nahe Versorgungshubs)
	Methanol ≤ 1.500 m^3		
	Ammoniak ≤ 1.500 m^3		
	L-Wasserstoff ≤ 1.000 m^3		
Mittel	LNG ≤ 4.500 m^3	250	Die Vielfältigkeit des Produktportfolios wird voraussichtlich eher über kleine Einheiten abgedeckt, große Einzelnachfragemengen, die wahrscheinlich vor allem in der Nordsee verortet sein werden, über große Einheiten mit großem Aktionsradius; folglich wird der Bedarf für den Einsatz mittlerer Einheiten eher in abnahmestärkeren Gebieten der Ostsee gesehen. Moderater Aktionsradius
	Methanol ≤ 4.500 m^3		
	Ammoniak ≤ 4.000 m^3		
	L-Wasserstoff ≤ 3.000 m^3		
Groß	LNG ≤ 8.000 m^3	200	Bedarfe vor allem in Regionen mit großen Einzelabnahmemengen zu erwarten (voraussichtlich Nordsee) Überregionaler Aktionsradius (bei Bedarf über gesamtes Nachfragecluster)
	Methanol ≤ 9.000 m^3		
	Ammoniak ≤ 8.000 m^3		
	L-Wasserstoff ≤ 6.500 m^3		
Sehr Groß	LNG ≤ 20.000 m^3	150	Bedarfe vor allem in Regionen mit großen Einzelabnahmemengen zu erwarten (voraussichtlich Nordsee) Überregionaler Aktionsradius (bei Bedarf über gesamtes Nachfragecluster)
	Methanol ≤ 22.000 m^3		
	Ammoniak ≤ 20.000 m^3		
	L-Wasserstoff ≤ 16.000 m^3		

Notiz: Wird der antizipierten maximalen Anzahl an Bunkervorgängen je Einheit streng gefolgt, führt die zu einer geringen Anzahl an benötigten Bunkerschiffen. Grund ist die Betrachtung des Bedarfs eines gesamten Versorgungsclusters (Nord- und Ostsee), was vor allem bei kleinen Bunkereinheiten die geringeren Aktionsradien außer Acht lässt.

Tabelle 11 | Antizipierte durchschnittliche Anzahl Bunkervorgänge je Bunkereinheit

Die Bunkereinheiten wurden auf ihre Sinnhaftigkeit unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen des Bunkermarkts wie Versorgungsstruktur, Leistungsfähigkeit der Bunkereinheiten und Komplexität des Bunkers in Abhängigkeit vom Kraftstoff überprüft.

Anhand der Anzahl der Bunkervorgänge, die je Bunkereinheit antizipiert wurden und der benötigten Bunkervorgänge und -volumina wurden die folgenden zukünftig benötigten Bunkereinheiten kalkuliert:

Kraftstoff	Bunkereinheit	2030		2040		2050	
		Anzahl Bunkervorgänge [n]	Nötige Bunker-einheiten [n]	Anzahl Bunker-vorgänge [n]	Nötige Bunker-einheiten [n]	Anzahl Bunker-vorgänge [n]	Nötige Bunker-einheiten [n]
LNG	Tankwagen	3.603	-	4.863	-	5.957	-
	Kleines Bunkerschiff	265	2*	358	2–3*	318	2–3*
	Mittleres Bunkerschiff	43	1 x sehr groß	163	1 x groß 1 x sehr groß	172	1 x groß 1 x sehr groß
	Großes Bunkerschiff	8		23		22	
	Sehr großes Bunkerschiff	2		8		10	
Methanol	Tankwagen	1.256	-	2.102	-	3.179	-
	Kleines Bunkerschiff	138	1	282	2*	647	4–5*
	Mittleres Bunkerschiff	36	1 x sehr groß	279	1 x groß 1 x sehr groß	464	3 x groß 1 x sehr groß
	Großes Bunkerschiff	6		30		42	
	Sehr großes Bunkerschiff	1		7		15	
Ammoniak	Tankwagen	14	-	16	-	55	-
	Kleines Bunkerschiff	60	1	192	1–2*	541	3–4*
	Mittleres Bunkerschiff	14	1 x sehr groß*	138	1 x sehr groß	239	1 x groß 1 x sehr groß
	Großes Bunkerschiff	5		23		34	
	Sehr großes Bunkerschiff	-	-	10		20	
L-Wasserstoff	Tankwagen	35	-	446	-	1.595	-
	Kleines Bunkerschiff	2	1**	32	1	109	1
	Mittleres Bunkerschiff	-	-	23	1 x sehr groß	79	1 x sehr groß
	Großes Bunkerschiff	-		11		22	
	Sehr großes Bunkerschiff	-		1		4	

*Annahme von mehr Bunkereinheiten, als aus der Rechnung hervorgeht, da eine Region mehrere Häfen zusammenfasst.
**Mit Blick auf die weitere Entwicklung.

Tabelle 12 | Anzahl der Bunkervorgänge nach Bunkereinheiten und Kraftstoffen sowie abgeleitete nötige Bunkereinheiten in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in der Nordsee

Kraftstoff	Bunkereinheit	2030		2040		2050	
		Anzahl Bunkervorgänge [n]	Nötige Bunker-einheiten [n]	Anzahl Bunker-vorgänge [n]	Nötige Bunker-einheiten [n]	Anzahl Bunker-vorgänge [n]	Nötige Bunker-einheiten [n]
LNG	Tankwagen	4.437	-	3.665	-	4.048	-
	Kleines Bunkerschiff	784	5 x klein* 1 x mittel (groß*)	1.084	7 x klein* 1 x groß	1.019	7 x klein* 1 x groß
	Mittleres Bunkerschiff	15		65		65	
	Großes Bunkerschiff	-	-	1		1	
	Sehr großes Bunkerschiff	-		-	-	-	-
Methanol	Tankwagen	923	-	822	-	1.501	-
	Kleines Bunkerschiff	300	4 x klein* 1 x mittel	488	4 x klein* 1 x mittel	997	6 x klein* 2 x mittel
	Mittleres Bunkerschiff	19		150		281	
	Großes Bunkerschiff	-	-	-	-	-	-
	Sehr großes Bunkerschiff	-		-		-	
Ammoniak	Tankwagen	5	-	5	-	493	-
	Kleines Bunkerschiff	39	1 x mittel (groß*)	117	1 x groß	717	5 x klein* 1 x groß
	Mittleres Bunkerschiff	5		20		67	
	Großes Bunkerschiff	-	-	1		4	
	Sehr großes Bunkerschiff	-		-	-	-	-
L-Wasserstoff	Tankwagen	-	-	54	-	1.264	-
	Kleines Bunkerschiff	17	1 (1**)	124	1 x mittel	626	4 x klein* 1 x groß
	Mittleres Bunkerschiff	-		9		48	
	Großes Bunkerschiff	-	-	-	-	1	
	Sehr großes Bunkerschiff	-		-		-	-

*Annahme von mehr Bunkereinheiten, als aus der Rechnung hervorgeht, da eine Region mehrere Häfen zusammenfasst.
**Mit Blick auf die weitere Entwicklung.

Tabelle 13 | Anzahl der Bunkervorgänge nach Bunkereinheiten und Kraftstoffen sowie abgeleitete nötige Bunkereinheiten in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in der Ostsee

Eine räumliche Verortung der zukünftigen Bunkerstruktur über die Aufteilung nach Nord- und Ostsee hinaus wird auf Grundlage der durchgeführten Analysen nicht vorgenommen. Es ist jedoch zu erwarten, dass Bunkereinheiten aus etablierten Importterminals bedient werden und von dort aus die aufkommende Nachfrage innerhalb eines plausiblen Aktionsradius bedienen. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, eignen sich unterschiedliche Bunkerkonzepte für verschiedene Aktionsradien. Große Bunkerschiffe legen z. B. teils sehr große Distanzen zurück, um Kunden zu bedienen. Zusammenfassend wird basierend auf den durchgeführten Analysen sukzessive je Versorgungscluster (Nord- und Ostsee) die der folgenden Tabelle 14 zu entnehmende Anzahl an Bunkerschiffen zu implementieren sein:

		2030	2040	2050
Ostsee	**LNG**	5 x klein 1 x mittel	7 x klein 1 x groß	7 x klein 1 x groß
	Methanol	4 x klein 1 x mittel	4 x klein 1 x mittel	6 x klein 2 x mittel
	Ammoniak	1 x mittel	1 x groß	5 x klein 1 x groß
	L-Wasserstoff	1 x klein	1 x mittel	4 x klein 1 x groß
Nordsee	**LNG**	2 x klein 1 x sehr groß	2–3 x klein 1 x groß 1 x sehr groß	2–3 x klein 1 x groß 1 x sehr groß
	Methanol	1 x klein 1 x sehr groß	2 x klein 1 x groß 1 x sehr groß	4–5 klein 3 x groß 1 x sehr groß
	Ammoniak	1 x klein 1 x sehr groß	1–2 x klein 1 x sehr groß	3–4 x klein 1 x groß 1 x sehr groß
	L-Wasserstoff		1 x sehr groß	1 x klein 1 x sehr groß

Tabelle 14 | Kumulierte Anzahl benötigter Bunkerschiffe je Versorgungscluster (Nord- und Ostsee)

In den Statistiken zu Güterumschlägen des Statistischen Bundesamts sind insgesamt 22 deutsche Seehäfen ausgewiesen, von denen 8 ein Umschlagvolumen von mehr als 5 Mio. t jährlich aufweisen. Werden die vorangehend kalkulierten insgesamt 49 im Jahr 2050 benötigten Bunkerschiffe dem gegenübergestellt, wird deutlich, dass nicht jede der 4 Kraftstoffoptionen in jedem Hafen durch ein Bunkerschiff abgebildet wird. Wird davon ausgegangen, dass die 12 großen und sehr großen Bunkerschiffe vornehmlich den 8 größeren Seehäfen zugeordnet werden können, gilt Gleiches für die Bedienung von großen Abnahmemengen alternativer Kraftstoffe.

Nachfolgend (siehe Abbildung 34, Abbildung 35, Abbildung 36 und Abbildung 37) dargestellt sind (mögliche) Standorte von Importterminals für die Kraftstoffoptionen LNG, Methanol und Ammoniak. Viele von ihnen befinden sich noch in der Planung und bei einigen scheint es wahrscheinlich, dass sie nicht in eine Umsetzungsphase überführt werden. Dennoch soll mit den Darstellungen ein Eindruck vermittelt werden, von welchem Hub aus die Versorgung der Bunkereinheiten stattfinden könnte und wie sich die räumliche Abdeckung (als „Wolken" dargestellt) gestaltet.

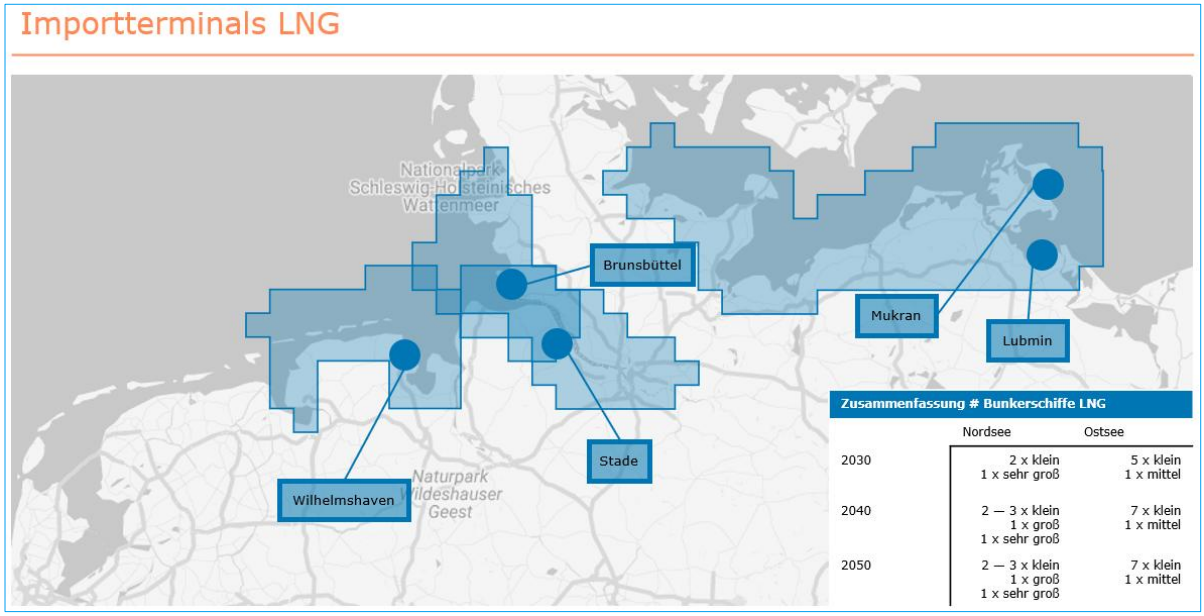


Abbildung 34 | (Potenzielle) Importterminals mit Versorgungsgebieten LNG

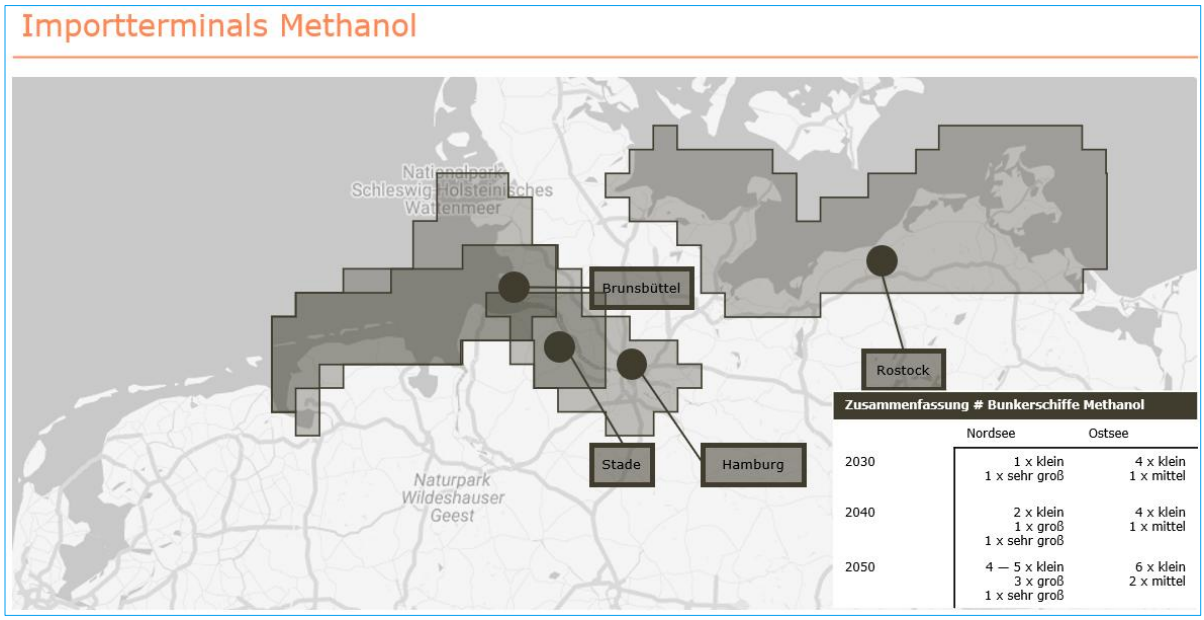


Abbildung 35 | (Potenzielle) Importterminals mit Versorgungsgebieten Methanol

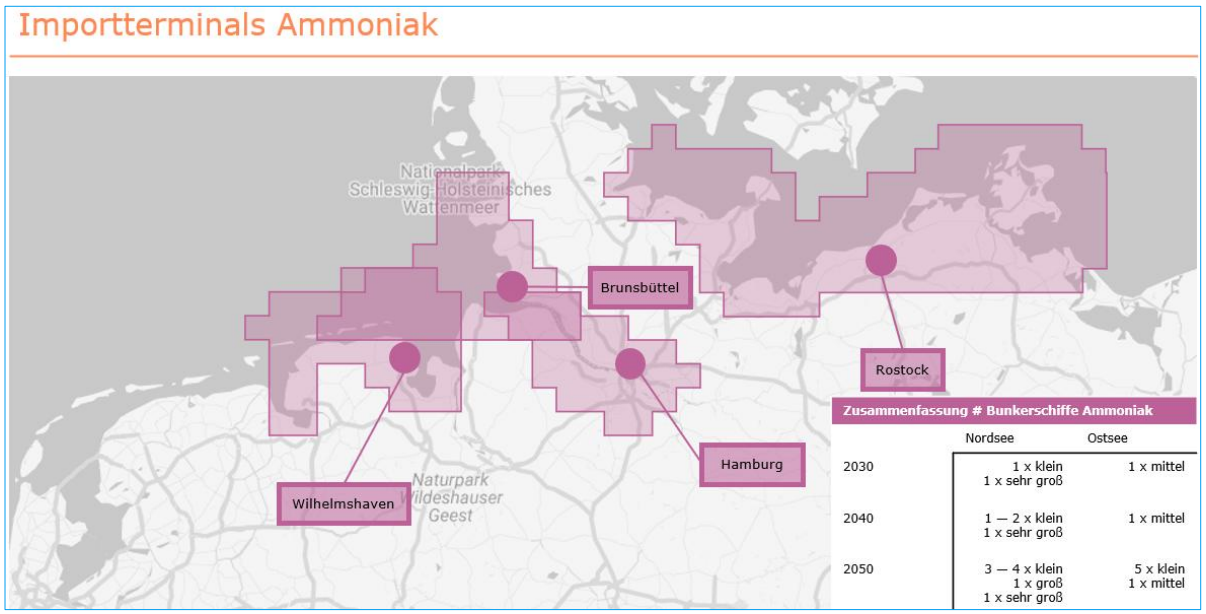


Abbildung 36 | (Potenzielle) Importterminals mit Versorgungsgebieten Ammoniak

Für Wasserstoff ist neben geplanten Terminalstandorten vor allem eine Vielzahl an Erzeugungsstandorten (Elektrolyseurstandorte) geplant. Diese Projektanbahnungen befinden sich häufig nahezu auf oder ganz auf Terminalgebieten, um die Anbindung an ein Distributionsnetzwerk zu gewährleisten. Die nachstehende Abbildung zeigt mögliche Wasserstofferzeugungs- und Terminalstandorte, die als Versorgungsstruktur für Bunkereinheiten dienen können.

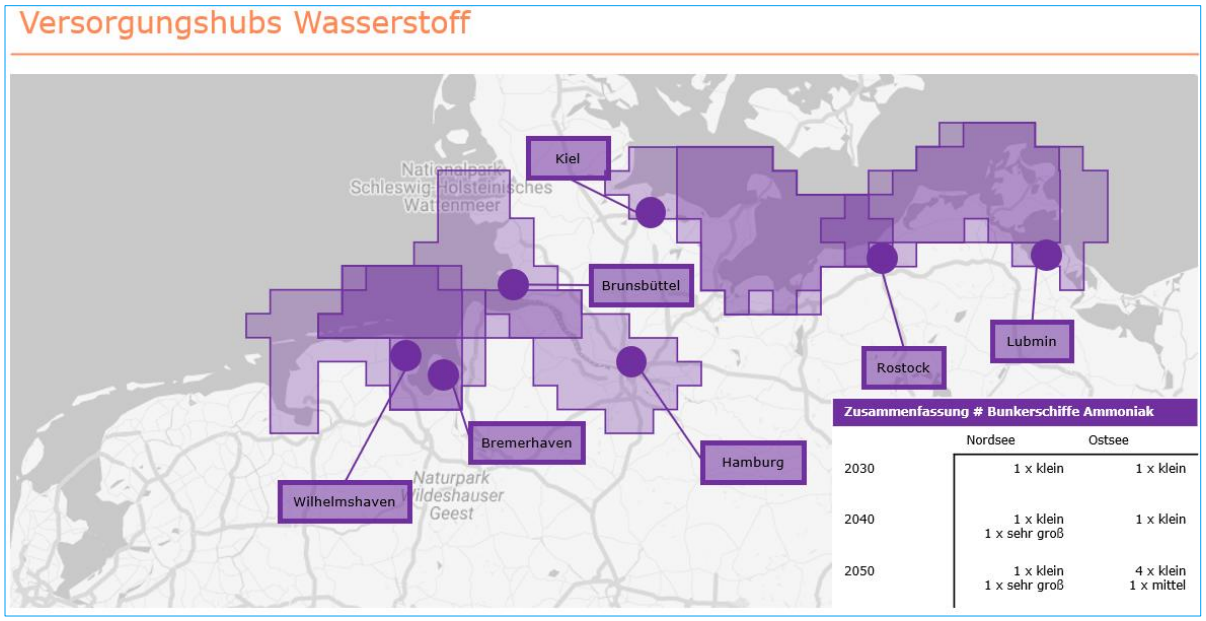


Abbildung 37 | (Potenzielle) Versorgungshubs mit Versorgungsgebieten Wasserstoff

Wie den Abbildungen entnommen werden kann, überschneiden sich die möglichen Versorgungsgebiete der Versorgungshubs. Diese Darstellung ist rein indikativ zu verstehen. Je nach Nachfrage- und Angebotsstruktur variieren die Distributionsstrukturen stark.

Ein Überblick über die an den dargestellten Orten geplanten/umgesetzten Projekte kann Tabelle 15 entnommen werden. Die Liste erhebt nicht den Anspruch vollständig zu sein, sondern enthält

für die Bunkerstruktur als relevant eingeschätzte Planungen. Der Projektstatus sollte regelmäßig auf Aktualität überprüft werden.

Standort	Energieträger	Projekt/Betreiber	Kapazität/Ausbau	Inbetriebnahme
Lubmin	LNG	Deutsche ReGas	5,2 Mrd. m^3/a	Januar 2023
	Wasserstoff	HH2E, MET Group	60.000 t/a	2025
		Deutsche ReGas	200–300 MW	2026
		APEX	600 MW	2027
		Lhyfe	330 t/d	2029
Mukran	LNG	Deutsche ReGas	13–35 Mrd. m^3/a (unterschiedliche Angaben)	Q1 2024 (?)
Rostock	Methanol	Großtanklager Ölhafen Rostock GmbH	Bereits heute Umschlag von Methanol	
		Ggf. Weiterentwicklung des Rostocker Hafens als Importhafen für alternative Energieträger		
	Ammoniak	Yara, VNG	Ausbau des bereits vorhandenen Terminals, aktuelle Kapazität: 600.000 t/a, geplant 3 Mio. t/a Rostock + Brunsbüttel	
	Wasserstoff	rostock EnergyPort cooperation GmbH	6.500 t/a (Ausbaustufe 1)	Ende 2026
Kiel	Wasserstoff	Umstellung des Betriebs des Küstenkraftwerks bis 2035 auf Wasserstoff geplant → Etablierung einer großskaligen Wasserstoffinfrastruktur nötig		
Brunsbüttel	LNG	German LNG	Aktuell FSRU, Ausbau zu fest installiertem Importterminal geplant (bis 2026)	Q1 2023
	Methanol	Vivevo Energy GmbH	Produktion von E-Methanol im ChemCoastPark	
	Ammoniak	Yara	Umrüstung des vorhandenen Export- zu einem Importterminal, geplant 3 Mio. t/a Rostock + Brunsbüttel	
		RWE	Ausbaustufe 1: 300.000 t/a Ausbaustufe 2: 2 Mio. t/a	2026
	Wasserstoff	RWE	Errichtung eines Crackers am Ammoniak-Importterminal	

Standort	Energieträger	Projekt/Betreiber	Kapazität/Ausbau	Inbetriebnahme
Hamburg	Methanol	Hamburger Blue Hub	Importhafen für synthetische Brenn- und Treibstoffe	2026
	Ammoniak	Mabanaft, Air Products	Ammoniakimportterminal mit nachgelagertem Cracker und H2-Verflüssigungsanlage	2027
	Wasserstoff			
		Hamburg Green Hydrogen Hub Konsortium	100-MW-Elektrolyseur, weitere Ausbaustufen mit bis zu + 700 MW möglich	2026
Stade	LNG	Hanseatic Energy Hub	Aktuell FSRU, ab 2027 fest installiertes Importterminal	Q4 2023
	Methanol	DOW Stade	Planung von großskaliger Produktion von E-Methanol, vereinzelte Pressemeldungen verkünden jedoch den Abbruch des Projekts	
Wilhelmshaven	LNG	Uniper	Zunächst FSRU, langfristig fest installiertes Importterminal geplant	Q4 2022
	Ammoniak	Uniper	Importterminal, 300.000 t/a Wasserstoff gemeinsam mit Elektrolyseur	
		bp	Ammoniakimportterminal mit Cracker, 130.000 t/a (Wasserstoff)	2028
	Wasserstoff	TES, EWE	500-MW-Elektrolyseur	
		TES, FFI	Importterminal, 5 Mio. t/a (Import von E-Methan und anschließende Rückgewinnung von Wasserstoff)	2026
		bp	Installation eines Ammoniakcrackers, 130.000 t/a (Wasserstoff)	2028
		Uniper	1-GW-Elektrolyseur, 300.000 t/a gemeinsam mit Importterminal (Ammoniak)	
		VoltH_2 Operating B.V.	Entwicklung von 6 Anlagen zur Produktion von grünem Wasserstoff in NL & DE; in WHV bis zu 100 MW	2028

Tabelle 15 | Projekte & Projektplanung von Hubs für alternative Energieträger/Kraftstoffe

Binnenschifffahrt

Für die Binnenschifffahrt wird im Rahmen dieser Studie von einem energetisch gleichbleibenden Bedarf an Bunkern bis zum Jahr 2050 ausgegangen. Eine Erhöhung der benötigten Bunkereinheiten kann jedoch aus der geringeren volumetrischen Energiedichte der alternativen Energieträger im Vergleich zum aktuell hauptsächlich verbunkerten Marinediesel folgen. Die im Rahmen des Szenarios im Jahr 2050 zu erwartende zusätzlich benötigte Menge an Bunkergut (auf Grundlage des angenommenen Bunkermengenmixes) beträgt jährlich ca. 100.000 t, was einem Volumen-Plus von ungefähr 40 % entspricht.

Die Analyse der Bunkerstrukturen der Binnenschifffahrt gibt starke Hinweise darauf, dass ein Großteil der Bunkervorgänge für die Binnenschifffahrt aus Bunkerstrukturen bedient wird, die ebenfalls für die Seeschifffahrt eingesetzt werden. Zudem ist der zunehmende Einsatz von Bunkerschiffen mit größeren Ladetankvolumina zu erwarten, um der gesteigerten volumetrischen Bunkernachfrage gerecht zu werden.

Auch die Möglichkeit der Umrüstung bestehender Bunkerstrukturen für den Einsatz alternativer Kraftstoffe kann für die Binnenschifffahrt, vor allem kurzfristig, eine wichtige Option darstellen. Maßgeblich ist hier jedoch, inwiefern die alternativen Kraftstoffe mit den aktuellen Super- und Infrastrukturen kompatibel sind. Gerade für Wasserstoff und Ammoniak ist demzufolge dennoch die Etablierung vereinzelter neuer Bunkerstrukturen nötig. Diese setzen sehr wahrscheinlich auf die Etablierung logistischer Ketten für andere Abnehmer (z. B. industrielle Energieversorgung, weiterer Verkehrssektor) auf. Methanol hingegen bietet aufgrund seiner stofflichen Eigenschaften gute Voraussetzungen, auf frei werdende Kapazitäten bestehender Bunker- und Lagerstrukturen aufzusetzen.

Das Marktgeschehen und die Technologieentwicklungstrends in der Binnenschifffahrt sollten iterativ neu analysiert und bewertet werden, um frühzeitig auf neue und ggf. unerwartete Entwicklungen reagieren zu können und die aktuell noch vielen Unsicherheiten bezüglich Prognosen zu Marktentwicklungen dezidieren zu können.

5.4 Neubaupreise von Bunkerschiffen

Um eine Indikation der Preise für Bunkereinheiten in den zuvor ermittelten Größen geben zu können, wurden Neubaupreise in Dienst befindlicher bzw. bestellter Bunker- und Tankschiffe in den jeweiligen Segmenten ausgewertet. Das Ergebnis für Schiffe, die grundsätzlich dazu in der Lage sind, Ammoniak zu befördern, kann in Abbildung 38 nachvollzogen werden. Derartige Auswertungen wurden ebenfalls für LNG- und Methanoltankschiffe durchgeführt und jeweils auf den Bereich der Tankkapazitäten der in Kapitel 0 angenommenen Bunkerschiffe konzentriert. Ergebnis der Betrachtungen ist neben der Verteilung der Neubaupreise zur Tankkapazität auch eine Trendfunktion, anhand derer sich größenabhängig theoretische Neubaupreise ableiten lassen. Da die Neubaupreise größtenteils in USD angegeben werden, wurden für die Umrechnung in € die entsprechenden Wechselkurse zum Zeitpunkt der Indienststellung angewandt.

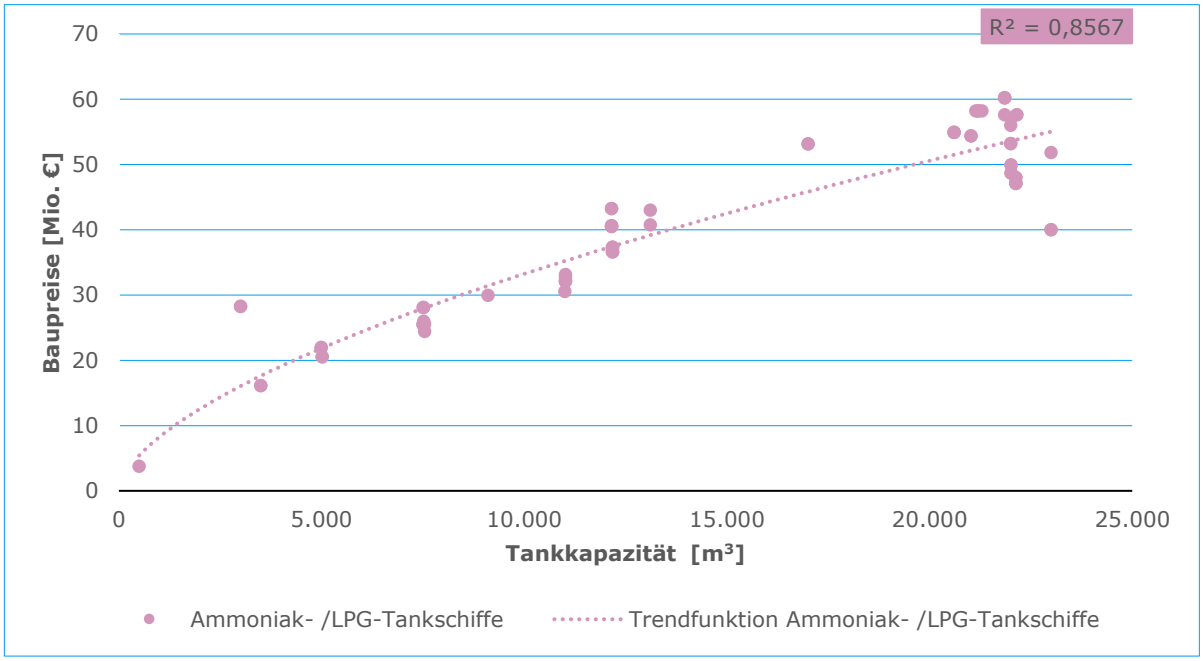


Abbildung 38 | Neubaupreise von LPG-, LPG-Ethylen- und Ammoniak-Gas-Carriern in Abhängigkeit von der Kapazität

Die Trendfunktionen wurden auf die jeweiligen Kraftstoffe und Tankkapazitäten umgelegt und veranschaulichen die theoretischen Neubaupreise für die entsprechenden Einheiten. Es wird deutlich, dass die Komplexität der Tanksysteme, Systeme zum Ladungsumschlag etc. einen entscheidenden Einfluss auf die Preise der Bunkerschiffe besitzen. Bunkerschiffe für Methanol weisen im Vergleich zu denen mit den anderen Kraftstoffen die niedrigsten Preise auf, was nicht zuletzt auf die vergleichsweise einfache Handhabbarkeit/Speicherung von Methanol unter atmosphärischen Bedingungen zurückgeführt werden kann. Im oberen Preissegment der Bunkerschiffe sind LNG- und Wasserstoffbunkerschiffe zu verorten, wobei für Letztere mangels in Dienst gestellter Schiffe eine Annahme für die Preisbildung getroffen werden musste (Aufschlag auf den Preis von LNG-Bunkerschiffen). Die hohen Preise für LNG-Bunkerschiffe sind u. a. mit der starken Isolierung der Tanksysteme für die tiefkalt verflüssigte Ladung zu begründen, die den Einsatz teils kostspieliger Materialien erheblich erhöht.

Bei der Deutung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die dargestellte Tabelle 16 auf Tankschiffneubauten aus dem Zeitraum 2015–2023 (wenige aus 2022/2023) basiert, von denen nur ein geringer Teil als Bunkerschiff ausgelegt ist. Es ist mit erhöhten Preisen für die Auslegung der Schiffe als Bunkerschiffe zu rechnen. Des Weiteren sind durch die starke Gewichtung der Neubaupreise auf die Jahre vor 2022 jüngste Materialpreissteigerungen noch nicht berücksichtigt. Ebenso handelt es sich bei den Schiffen fast vollständig um Neubauten aus Asien. Die aus einer Schiffsdatenbank (Clarksons) generierten Neubaupreise wurden mit einem auf die Bestelljahre bezogenen Wechselkurs von USD in € überführt. Durch einen Bau in Europa erhöhte Preise sind nicht inkludiert.

Kraftstoff	LNG		Methanol		Ammoniak		Wasserstoff*	
Eigenschaft	Kapazität [m³]	Preis [Mio. €]	Kapazität [m³]	Preis [Mio. €]	Kapazität [m³]	Preis [Mio. €]	Kapazität [m³]	Preis [Mio. €]
Kleines Bunkerschiff	1.500	32,8	1.500	4,5	1.500	10,5	1.000	35,5
Mittleres Bunkerschiff	4.000	42,1	4.500	10,4	4.000	19,1	3.000	47,0
Großes Bunkerschiff	8.000	63,2**	9.000	17,6	8.000	29,0	6.500	75,2**
Sehr großes Bunkerschiff	20.000	84,4**	22.000	34,5	20.000	50,6	16.000	94,2**

Tabelle 16 | Potenzielle Neubaupreise der Bunkerschiffe für die Kraftstoffe und Kapazitäten aus den Bunkerstrukturkonzeptionen

*Annahme eines Aufpreises von 20 % auf den entsprechenden Preis für einen LNG-Carrier mit gleicher Ladungskapazität.

**Lediglich wenige Daten als Basis für eine valide Kostenschätzung verfügbar, daher manuelle Adjustierung entsprechend der Entwicklung des Preis-Ladungskapazität-Verhältnisses von Methanol und Ammoniak sowie Indikationen aus der Praxis.

Kraftstoff	LNG		Methanol		Ammoniak		Wasserstoff*	
Eigenschaft	Preis [Mio. €]	+ 25 % [Mio. €]	Preis [Mio. €]	+ 25 % [Mio. €]	+ 25 % [Mio. €]	+ 25 % [Mio. €]	Preis [Mio. €]	+ 25 % [Mio. €]
Kleines Bunkerschiff	32,8	41,0	4,5	5,7	10,5	13,2	35,5	44,4
Mittleres Bunkerschiff	42,1	52,2	10,4	13,0	19,1	23,9	47,0	58,7
Großes Bunkerschiff	63,2	79,0	17,6	22,0	29,0	36,3	75,2**	94,0
Sehr großes Bunkerschiff	84,4	105,5	34,5	43,2	50,6	63,2	94,2**	117,8

Tabelle 17 | Potenzielle Neubaupreise der Bunkerschiffe für die Kraftstoffe und Kapazitäten aus den Bunkerstrukturkonzeptionen inkl. Contingency

Werden die potenziellen Neubaupreise der Bunkerschiffe auf die aus den Bunkerszenarien abgeleiteten nötigen Bunkereinheiten übertragen, ergeben sich Anhaltspunkte für die nötigen Investitionsaufwendungen für den Bau einer entsprechenden Bunkerflotte. Dabei wurde angenommen, dass neu gebaute Einheiten eine minimale Lebensdauer von 20 Jahren aufweisen. Benötigte Einheiten werden demzufolge nur einmal (in dem ersten Jahr, in dem sie benötigt werden) berücksichtigt, um Dopplungen zu vermeiden. In den Kostenschätzungen sind weder Zuschläge für zu erwartende Material- und Baupreiskosten noch für eine Angleichung an ein europäisches Baupreisniveau und ebenfalls keine Sicherheitszuschläge für im Rahmen von Kostenschätzungen übliche Abweichungen enthalten.

Im Ergebnis wurden die folgenden Gesamtkosten für die Nordsee (siehe Tabelle 18 und Tabelle 19) aufsummiert:

Kraftstoff	Bunkereinheit	Jahr					
		2030		2040		2050	
		Anzahl Schiffe	Kosten [Mio. €]	Anzahl Schiffe	Kosten [Mio. €]	Anzahl Schiffe	Kosten [Mio. €]
LNG	Kleines Bunkerschiff	2	82	1	41		
	Mittleres Bunkerschiff						
	Großes Bunkerschiff			1	79		
	Sehr gr. Bunkerschiff	1	106				
Methanol	Kleines Bunkerschiff	1	6	1	6	3	17
	Mittleres Bunkerschiff						
	Großes Bunkerschiff			1	22	2	44
	Sehr gr. Bunkerschiff	1	43				
Ammoniak	Kleines Bunkerschiff	1	13	1	13	2	26
	Mittleres Bunkerschiff						
	Großes Bunkerschiff					1	36
	Sehr gr. Bunkerschiff	1	63				
Wasserstoff	Kleines Bunkerschiff	1	44				
	Mittleres Bunkerschiff						
	Großes Bunkerschiff						
	Sehr gr. Bunkerschiff			1	118		
SUMME pro Dekade [Mio. €]			**357**		**279**		**124**
SUMMME gesamt bis 2050 [Mio. €]							**759**

Tabelle 18 | Potenzielle Neubaukosten Bunkerflotte Nordsee [Mio. €] inkl. Contingency[19]

[19] Disclaimer:

- Kostenschätzungen auf Basis von Neubaupreisen vornehmlich aus dem Jahr 2018 und von asiatischen Werften.
- Preiserhöhungen für Neubau in Europa und Auslegung als Bunkerschiff, Materialpreissteigerungen seit 2018 und zukünftige Entwicklungen sowie sonstige Sicherheitszuschläge nicht berücksichtigt.
- Umrechnung in € auf Basis aktueller Wechselkurse.

Für die Ostsee ergeben sich die folgenden Kostenschätzungen:

Kraftstoff	Bunkereinheit	Jahr					
		2030		2040		2050	
		Anzahl Schiffen	Kosten [Mio. €]	Anzahl Schiffen	Kosten [Mio. €]	Anzahl Schiffen	Kosten [Mio. €]
LNG	Kleines Bunkerschiff	5	205	2	82		
	Mittleres Bunkerschiff	1	52				
	Großes Bunkerschiff			1	79		
	Sehr gr. Bunkerschiff						
Methanol	Kleines Bunkerschiff	4	23			2	11
	Mittleres Bunkerschiff	1	13			1	13
	Großes Bunkerschiff						
	Sehr gr. Bunkerschiff						
Ammoniak	Kleines Bunkerschiff					5	66
	Mittleres Bunkerschiff	1	24				
	Großes Bunkerschiff			1	36		
	Sehr gr. Bunkerschiff						
Wasserstoff	Kleines Bunkerschiff	1	44			4	177
	Mittleres Bunkerschiff			1	59		
	Großes Bunkerschiff					1	94
	Sehr gr. Bunkerschiff						
SUMME pro Dekade [Mio. €]			**361**		**256**		**362**
SUMMME gesamt bis 2050 [Mio. €]							**979**

Tabelle 19 | Potenzielle Neubaukosten Bunkerflotte Ostsee [Mio. €] inkl. Contingency[20]

Ein Vergleich der Kostenschätzungen zeigt, dass für die Ostsee mit ca. 980 Mio. € im Vergleich zur Nordsee mit ca. 760 Mio. € ein deutlich höheres Investitionsvolumen nötig wird. Diese höhere Zahl begründet sich in der Struktur der nötigen Bunkerflotte. In der Ostsee werden in der zugrunde liegenden Kalkulation vor allem viele kleine Bunkerschiffe benötigt (23 in der Ostsee, 13 in der Nordsee). Diese sind gemessen an den Bunkervorgängen und -volumina, die sie umsetzen

[20] Disclaimer:

- Kostenschätzungen auf Basis von Neubaupreisen vornehmlich aus dem Jahr 2018 und von asiatischen Werften.
- Preiserhöhungen für Neubau in Europa und Auslegung als Bunkerschiff, Materialpreissteigerungen seit 2018 und zukünftige Entwicklungen sowie sonstige Sicherheitszuschläge nicht berücksichtigt.
- Umrechnung in € auf Basis aktueller Wechselkurse.

können, teurer als die großen Bunkerschiffe und verursachen daher in Summe höhere Neubaukosten. Die höhere Anzahl an benötigten kleinen Bunkerschiffen gründet darin, dass auch in der Ostsee das gesamte Kraftstoffportfolio durch den einzelnen Kraftstoffen gewidmete Bunkerschiffe zur Verfügung gestellt werden muss. Gleichzeitig sind die Einzelabnahmemengen an Bunkern in der deutschen Ostsee in der Regel geringer, sodass große und sehr große Bunkerschiffe, die auch eine Vielzahl der kleinen Bunkervorgänge abdecken können, nicht benötigt werden.

In der Gesamtheit zeigt die Kostenschätzung, dass im Rahmen der vorliegenden Studie über die beiden Versorgungscluster Nord- und Ostsee hinweg ein nötiges Investitionsvolumen von 1,74 Mrd. € kalkuliert wurde. Dieser Zahl liegen die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Annahmen, Eingangsdaten und Szenarien zugrunde, weshalb starke Abweichungen (50–100 %) zu den real benötigten Kosten möglich und sehr wahrscheinlich sind. Zudem sind Kostenoptimierungen für die CAPEX und OPEX von zukünftigen Bunkerstrukturen nicht Bestandteil der vorliegenden Studie. Die Kostenschätzung basiert auf einem Modell, das die Deckung der prognostizierten Bedarfe durch ausreichend Bunkerschiffe zum Ziel hat. Eine detaillierte Kostenschätzung sowie eine Optimierung der Kosten sind als Bestandteile aufbauender Untersuchungen zu empfehlen.

Die Kostenschätzung berücksichtigt einen Aufbau der Bunkerschiffsflotte lediglich durch Neubauten. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass ein Teil der benötigten Bunkerschiffe auch als Umbau bereits vorhandener Tank- bzw. Bunkerschiffe etabliert wird. Die benötigte Investition ist im Vergleich zu Neubauten als geringer einzustufen. Aufgrund der bestehenden Flotte und stofflicher Eigenschaften einzelner alternativer Kraftstoffe ist diese Option für Methanol und zum Teil auch für Ammoniak (Umrüstung von LPG-Schiffen) bereits heute unter voraussichtlich überschaubarem Aufwand möglich.

6 FAZIT UND HANDLUNGSLEITFADEN

Die in den vorangehenden Kapiteln durchgeführten Recherchen, Analysen, Szenarienmodellierungen und die darauf basierenden Schlussfolgerungen sollen abschließend in Handlungsempfehlungen für eine zielgerichtete Unterstützung der Entwicklung des Bunkermarkts für alternative Kraftstoffe in Deutschland überführt werden.

Die nachfolgenden Empfehlungen wurden nach den Themenschwerpunkten Infrastruktur und Regulatorik sortiert, die sich gegenseitig stark beeinflussen.

Die dafür maßgeblich relevanten **Kernempfehlungen** der Studie können wie folgt zusammengefasst werden:

Infrastruktur

1. **Erkenntnis:** Die Bereitstellung von alternativen Energieträgern für den Bunkermarkt in den deutschen Seehäfen sowie im Binnenwasserstraßennetz ist ein Servicemerkmal für einen Standort, um das weitere Dienstleistungsangebote formuliert werden können und das für den Hafenstandort weitere Schiffsverkehre attraktivieren kann.

   Empfehlung: Es ist die zeitgerechte und verlässliche Bereitstellung von Bunkerschiffen je alternativen Energieträger in der szenarioabhängigen Anzahl zu gewährleisten, um die entsprechenden Mengenpotenziale in der Versorgung der Schifffahrt erschließen zu können.

2. **Erkenntnis:** Eine sich entsprechend dem Szenario 2B entwickelnde Veränderung der Bunkernachfrage und Verschiebung des Kraftstoffmixes hin zu emissionsneutralen Kraftstoffen erfordert den zeitgerechten und ambitionierten Aufbau einer angepassten Bunkerflotte.

   Empfehlung: Hinsichtlich des Beschaffungsrhythmus ist eine Langfristplanung mit Blick auf die voraussichtlichen zukünftigen Bedarfe unter Berücksichtigung der maximal benötigten Größe der Bunkereinheiten unbedingt über die gesamten Stützjahre hinweg zu beachten. Empfehlungen zur Beschaffung können im Rahmen der vorliegenden Studie zunächst nur für die betrachteten Stützjahre 2030, 2040 und 2050 getroffen werden. Es ist jedoch in den Überlegungen inkludiert und unbedingt zu empfehlen, dass die Beschaffung der nötigen Bunkerschiffe über die gesamte vorangehende Dekade erfolgt. Zudem sind für die Ausarbeitung einer erfolgreichen und zeitgerechten Beschaffungsstrategie für Neubauten Vorlaufzeiten für die Beschaffung von Bunkerschiffen mitzudenken. Im Idealfall sollte der Beschaffungszyklus 5 Jahre vorher angedacht werden. Dazu gehören die Konzeptentwicklungs- und Designphase, die Vorbereitung und Durchführung der Ausschreibungs- und Angebotsphase, die Vertragsverhandlungen sowie die Ausführungs- und Abnahmephase. Auch die ebenso mögliche Umrüstung von gegenwärtig als Tankern eingesetzten Schiffen geht mit niedrigeren monetären und zeitlichen Herausforderungen einher.

3. **Erkenntnis:** Tankschiffe für den interkontinentalen Energieträgertransport haben andere Dimensionen als Bunkerschiffe, die im Vergleich als eher klein bezeichnet werden können. Zudem weisen die verschiedenen Bunkerschiffsgrößen unterschiedliche Schiffsdimensionen auf. Hieraus ergeben sich veränderte Anforderungen an die Befüllstationen (z. B. Ladeplattformhöhe im Verhältnis zur Deckshöhe, Schiffslänge im Verhältnis zu Festmacherdalben und Fenderlinien).

   Empfehlung:
   a) Für Bunkerschiffe sind zwingend ausreichend Befüllschnittstellen und Abfertigungskapazitäten an den Import- und ggf. Distributionsterminals vorzusehen. Explizit eingeschlossen ist hierbei die Schaffung genehmigungsrechtlicher Grundlagen. Durch Importvorgänge hochgradig ausgelastete Anleger bzw. Liegeplätze sind zwingend um Anlegerkapazitäten für die Befüllung von Bunkerschiffen zu ergänzen, eine standortgenaue Umlage der hier ermittelten Gesamtbedarfe und abzubildenden Bunkerschiffsgrößen ist separat zu ermitteln. Diese Liegeplätze sollten möglichst am Ort der Lade- und Löschvorgänge sein, um ein wirtschaftlich unattraktives Verholen zu vermeiden.

   b) Die Befüllschnittstellen müssen auf die schiffsseitigen Anforderungen abgestimmt sein (z. B. Ladeplattformhöhen, Dalbenabstände, Fenderlinien). Die nachträgliche Anpassung von Gegebenheiten geht mit zusätzlichem Aufwand einher.

4. **Erkenntnis:** Eine große Anzahl von Bunkervorgängen wird ergänzend zu Bunkerschiffen durch Tank-Lkw durchgeführt.

   Empfehlung: Befüllstationen für Tank-Lkw in ausreichender Anzahl sind an den Import- und ggf. Distributionsterminals bereitzustellen.

Regulatorik

5. **Erkenntnis:** Eine Bunkerstrukturen und -vorgänge betreffende Regulatorik kann aktuell vor allem bezüglich alternativer Kraftstoffe als sehr lückenhaft und nicht harmonisiert bewertet werden. Teilweise existieren starke Unterschiede zwischen Standorten oder/und Bundesländern. Zudem sind Kommunikationswege und behördliche Zuständigkeiten sehr heterogen.

   Empfehlung: Es ist dringend erforderlich, regulatorische Rahmenbedingungen zum Bunkern alternativer Energieträger zwischen den Hafenstandorten an der deutschen Nord- und Ostseeküste zu harmonisieren, um den nötigen standortübergreifenden Einsatz der Bunkereinheiten zu erleichtern und für die Schifffahrt eine größtmögliche Flexibilität bei der Wahl des Bunkerstandortes unter gleichen Bedingungen zu gewährleisten. Möglichst ähnliche Rahmenbedingungen zur Kraftstoffübernahme zwischen den deutschen Hafenstandorten fördern die Verlässlichkeit und Flexibilität für die maritime Nachfrage.

6. **Erkenntnis:** Bis zum Jahr 2050 ist gegenüber dem heutigen Kraftstoffportfolio und den heute vornehmlich eingesetzten Tank- und Antriebstechnologien auf Schiffen mit einer

deutlich höheren Diversität zu rechnen. Es ist davon auszugehen, dass sich unterschiedliche Kraftstoffe besonders für jeweils verschiedene Schiffssegmente und Schiffsgrößenklassen eignen.

Empfehlung: Eine Priorisierung der Energieträger mit der für die jeweiligen Schiffstypen wahrscheinlich größten Marktdurchdringung und ein darauf abgestimmter Ausbau von Bunkerstrukturen an den für die jeweiligen Schiffstypen relevanten Terminalstandorten sind anzustreben.

a) In jedem Hafen sollte für die an diesem Standort nachgefragten Kraftstoffe und Bunkermengen proaktiv eine größtmögliche Anzahl von Bunkerliegeplätzen ausgewiesen werden. Wichtiger Indikator für die voraussichtlich standortspezifisch nachgefragten Kraftstoffe sind die die Häfen anlaufenden Schiffssegmente.

b) Das Verholen eines Schiffes ist als betriebswirtschaftlich unattraktiv einzustufen. Deshalb sollte der Umschlagliegeplatz gleichzeitig auch der Liegeplatz für den Bunkervorgang sein.

c) Wo möglich sollten SIMOPS-geeignete Bunkerliegeplätze ausgewiesen werden. Ausschlaggebend ist hier u. a. die Vereinbarkeit des verbunkerten Kraftstoffs mit den Umschlagaktivitäten.

7. **Erkenntnis:** Bunkerschiffe für fossile ölbasierte Kraftstoffe verfügen heute meist über einen Pool an als Warteplatz gewidmeten Liegeplätzen.

   Empfehlung: Geeignete Schiffswarteplätze in ausreichender Anzahl (an bzw. in geographischer Nähe zu den Standorten der Importterminals) sind auch für Bunkerschiffe alternativer Kraftstoffe auszuweisen bzw. zu errichten (z. B. in Tankhäfen). Ein zu weiträumiges Ausweichen der Bunkerschiffe aus ihrem Operationsbereich in Zeiträumen ohne Bunkervorgang ist zwingend zu vermeiden, um die Logistikkosten und Rüstzeiträume niedrig zu halten.

Aus der Bearbeitung der Studie haben sich weiterführende Empfehlungen ergeben, die nicht unmittelbar auf die eigentliche Aufgabenstellung der Studie abzielen und dennoch einen positiven Einfluss auf die Etablierung Deutschlands als Bunkerstandort haben.

Zu diesen **weiterführenden Empfehlungen** zählen:

1. **Erkenntnis:** Die qualitativen Eigenschaften der am Markt verfügbaren alternativen Kraftstoffe können sich derzeit aufgrund der unterschiedlichen Gestehungs- und Umwandlungsprozesse stark unterscheiden. Dies kann Einfluss auf die Verwendbarkeit der Kraftstoffe in Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen haben.

   Empfehlung:

   a) Die europäische und globale Standardsetzung bei Stoff- und Qualitätseigenschaften alternativer Energieträger für den Einsatz ist zu forcieren. Dies kann im Rahmen einer

festgelegten Spezifikation der Kraftstoffe erfolgen (wie z. B. der DIN EN 590 für Dieselkraftstoff).

b) Sofern die durch die Schifffahrt gestellten Anforderungen an die Kraftstoffe durch im Rahmen der Verwendung vorgelagerte Umwandlungsprozesse ohne aufwendige Aufbereitungsmaßnahmen nicht gewährleistet werden können, ist die Direktnutzung des originären Moleküls anzustreben. Dies ist z. B. bei Wasserstoff der Fall, der Crackingprozessen entstammt.

2. **Erkenntnis:** E- und Bio-Fuels gehen mit einem Aufpreis einher, der die Kosten zum Teil deutlich über denen fossiler ölbasierter Energieträger liegen lässt. Der Einsatz von Dual-Fuel-Antrieben bietet den Reedereien die Möglichkeit, flexibel auf Verfügbarkeitsveränderungen und Preisentwicklungen alternativer Kraftstoffe in den jeweiligen Fahrtgebieten zu reagieren und bei Angebotsengpässen und hohen Preisen ggf. temporär prioritär das Pilot Fuel zu nutzen. Ohne preisliche Attraktivierung besteht daher die Wahrscheinlichkeit, dass wieder vornehmlich Pilot Fuels als Main Fuel eingesetzt werden.

   Empfehlung:

   a) Als Unterstützung der Ramp-up-Phase der Bunkerabnahme kohlenstoffarmer und erneuerbarer Kraftstoffe (oder auch zur Bedienung von Spot-Nachfragemengen) sind Anreizmodelle (Incentivierungsmaßnahmen) denkbar. Diese können z. B. auf lokaler Ebene durch Maßnahmen wie die Anpassung von Hafengebühren zugunsten von emissionsarm betriebenen Schiffen und Bunkervorgängen nachhaltiger Kraftstoffe oder auch durch die gezielte Förderung von gesicherter Bereitstellung gewidmeter Kraftstoffmengen und deren Abnahme erfolgen.

   b) Eine Angleichung der steuerrechtlichen Behandlung (Bevorteilung) von im Bunkermarkt abgesetzten alternativen Energieträgern an etablierte Kraftstoffe ist zu empfehlen, um die monetäre Vorteilhaftigkeit CO_2-intensiver Kraftstoffe auch auf diesem Wege zu reduzieren und die Nachfrage von Alternativen zu stützen. Darüber hinaus sollten alternative Kraftstoffe in die kombinierte Nomenklatur des Zollsystems aufgenommen und mit einer Zolltarifnummer versehen werden.

   c) Über die Angleichung der steuerrechtlichen Behandlung hinaus sind weitere Maßnahmen zur Schließung des Fuel-Price-Gaps zwischen nachhaltigen und fossilen Kraftstoffen zu forcieren und zu unterstützen. Aktuell existieren bereits diverse Ansätze hierzu, wie etwa das EU ETS oder Vorschläge von bekannten Branchenverbänden und -räten.

3. **Erkenntnis:** Ein beschleunigtes Uptake alternativer Kraftstoffe bedarf zusätzlicher flankierender Maßnahmen in der Vermarktung und in der Konkretisierung der Bunkernachfrage.

   Empfehlung: Die Beteiligung an internationalen und durch die Bundesregierung unterstützten Instrumenten, wie etwa den maritimen grünen Korridoren ist proaktiv zu

fördern und die Häfen sind in der Bildung von entsprechenden Konsortien zu unterstützen, um überregional Synergien zwischen den Akteuren der gesamten Wertschöpfungskette nachhaltiger Kraftstoffe hinweg zu schaffen. Ein grüner Korridor bedingt mindestens 2 Punkte (Häfen), verbunden durch eine Transport-/Kraftstoffnachfrage (Schiffe).

LITERATUR

[01] **International Maritime Organization:** Revised GHG reduction strategy for global shipping adopted, veröffentlicht Juli 2023.

https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted-.aspx

[02] **Europäischer Rat der Europäischen Union:** Initiative „FuelEU Maritime": Rat verabschiedet neuen Rechtsakt zur Dekarbonisierung des Seeverkehrs, veröffentlicht Juli 2023.

https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/07/25/fueleu-maritime-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-maritime-sector/

[03] **FIS (Forschungsinformations-System):** Suprastruktur, letzte Änderung Februar 2013.

https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/405189/

[04] **Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie:** Bunkerlieferantenliste – Verzeichnis der Lieferanten von ölhaltigem Brennstoff, zuletzt aufgerufen Februar 2024.

https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Schifffahrt/Umwelt_und_Schifffahrt/MARPOL/_Module/Akkordeon/Anlage_6/Anlage_6.html

[05] **Energy Environment Forecast Analysis GmbH:** Entwicklung einer Methodik zur Ermittlung von Mineralöldaten für die Bundesländer, veröffentlicht September 2015.

https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-methodik-ermittlung-mineraloeldaten-bundeslaender.pdf?__blob=publicationFile&v=4

[06] **Port of Rotterdam:** Waterfront Shipping übernimmt Führungsrolle bei der Demonstration der Einfachheit des Methanol-Bunkerns für die Schifffahrtsindustrie, veröffentlicht Mai 2021.

https://www.portofrotterdam.com/de/nachrichten-und-pressemitteilungen/waterfront-shipping-uebernimmt-fuehrungsrolle-bei-der

[07] **Port of Rotterdam:** Entwicklung eines Importterminals für Wasserstoffträger im Rotterdamer Hafen, veröffentlicht April 2022.

https://www.portofrotterdam.com/de/nachrichten-und-pressemitteilungen/entwicklung-eines-importterminals-fuer-wasserstofftraeger-im

[08] **Gesamtkonzept Erneuerbare Kraftstoffe:** MariSynFuel, Synthetisches Methanol als maritimer Kraftstoff für die Schifffahrt aus Bremerhaven, zuletzt aufgerufen Februar 2024.

https://erneuerbarekraftstoffe.de/projects/marisynfuel/

[09] **Mabanaft:** Hamburger Energieunternehmen Mabanaft durchläuft Antragskonferenz zum Bau des Ammoniakimportterminals im Hamburger Hafen, veröffentlicht Juli 2023.

https://www.mabanaft.com/de/news-info/aktuelles-pressemitteilungen/news-detail/hamburger-energieunternehmen-mabanaft-durchlaeuft-antragskonferenz-zum-bau-des-ammoniakimportterminals-im-hamburger-hafen/

[10] **BEHALA:** Das Schubboot mit ganz neuem Energie-System, zuletzt aufgerufen Februar 2024.

https://www.behala.de/elektra/

[11] **Future Proof Shipping**: FPS Maas Retrofit Project, zuletzt aufgerufen Februar 2024.

https://futureproofshipping.com/projects/the-maas/

[12] **HOYER:** Hoyer Marine – Maritime Kompetenz, zuletzt aufgerufen Februar 2024.

https://www.hoyer.de/marine/

[13] **S&P Global Commodity Insights:** Hamburg HSFO, MGO premium to Rotterdam bunker fuel prices surges to 2015 high, veröffentlicht September 2015.

https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/shipping/090815-hamburg-hsfo-mgo-premium-to-rotterdam-bunker-fuel-prices-surges-to-2015-high

[14] **International Maritime Organization:** IMO's work to cut GHG emissions from ships, zuletzt aufgerufen Februar 2024.

https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx

[15] **Europäischer Rat, Rat der Europäischen Union:** Infografik – „Fit für 55": für mehr umweltfreundliche Kraftstoffe im Flug- und Seeverkehr, zuletzt aufgerufen Februar 2024.

https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/fit-for-55-refueleu-and-fueleu/

[16] **Deutsches Maritimes Zentrum:** Bunker Guidance für alternative Kraftstoffe in deutschen Seehäfen, veröffentlicht Februar 2021.

https://dmz-maritim.de/bunker-guidance-fuer-alternative-kraftstoffe-in-deutschen-seehaefen/

[17] **Zentralkommission der Rheinschifffahrt**: Roadmap der ZKR zur Verringerung der Emissionen in der Binnenschifffahrt, veröffentlicht März 2022.

https://ccr-zkr.org/files/documents/Roadmap/Roadmap_de.pdf

[18] **CE Delft:** Blue Speeds for shipping, Economic analysis and legal framework to achieve environmental benefits, veröffentlicht Juli 2022.

https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2022/10/CE_Delft_210439_Blue_Speeds_for_shipping_Def.pdf

[19] **MAN:** MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia, veröffentlicht Oktober 2023.

https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/man-b-w-two-stroke-engine-operating-on-ammonia.pdf

[20] **Wärtsilä:** Wärtsilä continues to set the pace for marine decarbonisation with launch of world-first 4-stroke engine-based ammonia solution, veröffentlicht November 2023.

https://www.wartsila.com/media/news/15-11-2023-wartsila-continues-to-set-the-pace-for-marine-decarbonisation-with-launch-of-world-first-4-stroke-engine-based-ammonia-solution-3357985

[21] **MAN Energy Solutions:** Industriekonsortium entwickelt Mittelschnellläufer mit Ammoniakantrieb, veröffentlicht April 2021.

https://www.man-es.com/de/unternehmen/pressemitteilungen/press-details/2021/04/07/industriekonsortium-entwickelt-mittelschnelllaeufer-mit-ammoniakantrieb

[22] **Anglo Belgian Corporation:** Schiffsantrieb und Hilfsaggregate, zuletzt aufgerufen Februar 2024.

https://www.abc-engines.com/de/markets/schiffsantrieb-und-hilfsaggregate#applications

[23] **Bundesministerium für Digitales und Verkehr:** Schifffahrtspolitik in der Europäischen Union, BMDV – Europäische Schifffahrtspolitik (bund.de), veröffentlicht März 2021.

[24] **ZKR:** Endbericht zur Vision 2018, veröffentlicht 2018.

https://ccr-zkr.org/files/documents/vision/Rapport_final_vision2018_de.pdf

[25] **VBW:** Alternative Kraftstoffe und Antriebstechnologien für Binnenschiffe. Ein Überblick, veröffentlicht Mai 2022.

[26] **DMZ:** Erarbeitung eines Vorschlags für technische Vorschriften zum Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff in der Binnenschifffahrt, veröffentlicht 2022.

[27] **Binnenschifffahrt (Magazin):** Wie „grün" kann die Binnenschifffahrt? – Binnenschifffahrt Online (binnenschifffahrt-online.de), veröffentlicht August 2019.

[28] **Bundesverband der deutschen Binnenschifffahrt e.V.:** Broschüre „Daten & Fakten" 2022/2023 – Über 182 Mio. t Güter auf deutschen Flüssen und Kanälen transportiert, veröffentlicht Oktober 2023.

[29] **Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie:** Schiffsemissionen, zuletzt aufgerufen Januar 2024.

https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Schifffahrt/Umwelt_und_Schifffahrt/Schiffsemissionen/schiffsemissionen_node.html

[30] **E.ON Energie Österreich GmbH:** Was ist Erdgas?, zuletzt aufgerufen Februar 2024.

https://www.eon-energie.at/at/service/faq/woraus-besteht-erdgas.html#:~:text=Erdgas%20setzt%20sich%20aus%20mehreren,)%20sowie%20Butan%20(C4H10).

[31] **Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie:** MARPOL-Übereinkommen, zuletzt aufgerufen März 2024.
https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Schifffahrt/Umwelt_und_Schifffahrt/MARPOL/marpol_node.html