

Adressat
Stadt Brunsbüttel

Dokumententyp
Bericht

Datum
August 2024

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Fährverbindung zwischen Brunsbüttel und Cuxhaven

Bericht



gefördert durch:

Wir fördern den ländlichen Raum



Landesprogramm ländlicher Raum: Gefördert durch die Europäische Union – Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER)
Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete



Bright ideas.
Sustainable change.

Confidential

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Fährverbindung zwischen Brunsbüttel und Cuxhaven

Bericht

Projektname **Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Fährverbindung zwischen Brunsbüttel
und Cuxhaven**
Projekt Nr. **352005939**
Empfänger **Stadt Brunsbüttel**
Dokumententyp **Bericht**
Version **02**
Datum **16.08.2024**

Ramboll
Kurt-Dunkelmann-Straße 2
18057 Rostock

www.ramboll.com/de-de

Ramboll Deutschland GmbH
Jürgen-Töpfer-Straße 48
22763 Hamburg

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

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

Inhalt

1.	Gegenstand der Studie	8
2.	Ausgangslage	9
2.1	Verkehrsgebiet und Routenverlauf der Fährverbindung	9
2.1.1	Straßenverbindung	9
2.1.2	Fährverbindung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel	9
2.1.3	Fährverbindung zwischen Glückstadt und Wischhafen	11
2.2	Fährbetrieb und -schiffe	11
2.2.1	FRS Helgoline GmbH & Co. KG (seit 2024)	11
2.2.2	Elbferry GmbH & Co. KG (2021)	11
2.2.3	Elb-Link Fährgesellschaft mbH (2015 bis 2017)	12
2.3	Merkmale der RoRo-Anleger	13
2.3.1	Cuxhaven	13
2.3.2	Brunsbüttel	14
2.4	Klimapolitische Zielsetzungen	15
2.5	Flotte von RoPax-Fähren	16
2.6	Zwischenfazit	18
3.	Alternative Kraftstoffoptionen	19
3.1	Vorauswahl Kraftstoffportfolio	19
3.2	Grundlegende stoffliche Eigenschaften alternativer Kraftstoffe	20
3.3	Kraftstoffoptionen	23
3.3.1	(Synthetischer) Diesel	23
3.3.2	Methanol	25
3.3.3	Wasserstoff	28
3.3.4	Erdgas (Methan)	31
3.3.5	Ammoniak	33
3.4	Antriebstechnologien	35

3.5	Umweltverträglichkeit	36
3.6	Regionale Verfügbarkeit	42
3.7	Zwischenfazit	44
4.	Indikative Kostenschätzungen	46
4.1	CapEx	46
4.2	OpEx	47
4.3	Zwischenfazit	51
5.	Zusammenfassende Bewertung	52
6.	Quellenverzeichnis	54

Abbildungen

Abbildung 1	Routenverlauf der Fährverbindung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel auf Basis der Schiffsbewegungen der ‚Greenferry 1‘ im Jahr 2021 und exemplarischer Schiffsbewegungen des ‚Halunder Jet‘ im Jahr 2024	10
Abbildung 2	Schiffsbewegungen der ‚Greenferry 1‘ zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel im Jahr 2021	12
Abbildung 3	RoRo-Anleger am Steubenhöft und Vorstaupfläche im Hafen von Cuxhaven im Jahr 2016	13
Abbildung 4	RoRo-Anleger und Vorstaupfläche bei Brunsbüttel im Jahr 2016	14
Abbildung 5	Key Critical Factors für die Vorauswahl von Kraftstoffen	19
Abbildung 6	Maritimes Kraftstoffportfolio	20
Abbildung 7	Referenzpreisindex für fossiles LSMGO in Rotterdam von 2021 bis 2024	24
Abbildung 8	Referenzpreisindex für Biodiesel in \$/mmBTU von 2022 bis 2024	25
Abbildung 9	Referenzpreisindex für fossiles Methanol in Rotterdam von 2021 bis 2024	26
Abbildung 10	Referenzpreisindex für Methanol in \$/mmBTU von 2022 bis 2024	27
Abbildung 11	Referenzpreisindex für Methanol von 2021 bis 2024	28
Abbildung 12	Referenzpreisindex für Wasserstoff im Mai 2024	30
Abbildung 13	Referenzpreisindex für grünen Wasserstoff im Jahr 2024	30
Abbildung 14	Referenzpreisindex für grünen Wasserstoff in Deutschland in 2024	31
Abbildung 15	Referenzpreisindex für fossiles LNG in Rotterdam von 2021 bis 2024	32
Abbildung 16	Referenzpreisindex für fossiles Erdgas von 2021 bis 2023	33
Abbildung 17	Referenzpreisindex für Ammoniak in \$/mmBTU von 2021 bis 2024	34
Abbildung 18	Referenzpreisindex für Ammoniak in \$/mt im Mai 2024	35

Abbildung 19 | Bewertung Marktreife der Kraftstoffoptionen und -
technologien

44

Tabellen

Tabelle 1	Typische stoffliche Eigenschaften herkömmlicher und alternativer Schiffskraftstoffe	22
Tabelle 2	Relative Umweltschädlichkeit alternativer Kraftstoffoptionen im Vergleich zum Einsatz von MGO	39
Tabelle 3	Gewichtete Umweltverträglichkeit alternativer Kraftstoffe im Fährbetrieb (Im Vergleich zum Einsatz von MGO)	41
Tabelle 4	Geplante Importhubs und Erzeugungsstrukturen für alternative Energieträger in HH, NDS und SH	43
Tabelle 5	CapEx Kostenschätzung	47
Tabelle 6	OpEx Kostenschätzung Kraftstoff	48
Tabelle 7	OpEx Kostenschätzung Personal	49
Tabelle 8	OpEx Kostenschätzung weitere Fixkosten	50
Tabelle 9	Überblick der jährlichen Kosten	50

Abkürzungsverzeichnis

ARA	Antwerpen, Rotterdam, Amsterdam
AS	Aksjeselskap (norw. für Aktiengesellschaft)
B	Bundesstraße
BAB	Bundesautobahn
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BV	Besloten vennootschap met beperkte aansprakelijkheid (niederl. für Kapitalgesellschaft mit beschränkter Haftung)
CapEx	Capital Expenditures
CCS	Carbon Capture and Storage
CESNI	Comité européen pour l'élaboration de standards dans le domaine de la navigation intérieure
C-H₂	Compressed Hydrogen
CNG	Compressed Natural Gas
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DIN EN	Deutsches Institut für Normung Europäische Norm
E-L-H₂	Strombasiert erzeugter, verflüssigter, Wasserstoff
ES-TRIN	Europäischer Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe
FdW	Fahrt durchs Wasser
FüG	Fahrt über Grund
GGAV	Gefahrgut-Ausnahmereverordnung
Ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GmbH & Co.KG	Gesellschaft mit beschränkter Haftung & Compagnie Kommanditgesellschaft
IMO	International Maritime Organization
LNG	Liquefied Natural Gas
LSMGO	Low Sulphur Marine Gas Oil
MDO	Marine Diesel Oil
MGO	Marine Gas Oil
mmBTU	Million british thermal units
MWh/m³	Volumetrische Energiedichte
NG	Natural Gas
NOK	Nord-Ostsee-Kanal
OpEx	Operational Expenditures

PEM	Proton Exchange Membrane
PtL	Power to Liquid
RoPAX	Roll-on/Roll-off/Passagiere
RoRo	Roll-on/Roll-off
SA	Société anonyme (franz. für Aktiengesellschaft)
SeeSchStrO	Seeschiffahrtsstraßenordnung
SMR	Steam Methan Reforming
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Level
USA	United States of America
USD/mmBTU	USD pro million british thermal units

1. Gegenstand der Studie

Die Elbe als eine der bedeutendsten Wasserstraßen Deutschlands übernimmt vor allem auf dem Abschnitt von Hamburg bis zu ihrer Mündung in die Nordsee eine Schlüsselfunktion für die internationale Anbindung Deutschlands an globale Güterströme. Gleichzeitig stellt dieser breite Fluss mit seinem hohen Verkehrsaufkommen eine natürliche Grenze zwischen Schleswig-Holstein und Niedersachsen dar. An beiden Uferseiten befinden sich neben Hamburg weitere etablierte Hafenstandorte und Städte. Hier sind insbesondere Brunsbüttel auf schleswig-holsteinischer und Cuxhaven auf niedersächsischer Seite zu nennen.

Um in dieser Region Schleswig-Holstein und Niedersachsen verkehrlich auf möglichst kurzem Wege miteinander zu verbinden, bietet sich mit Blick auf die geografische Lage eine Verbindung beider genannter Hafenstandorte durch Queren der Elbe an. Schon in der Vergangenheit wurden öfter regelmäßige Fährverbindungen auf der Strecke etabliert, die jedoch nicht dauerhaft aufrechterhalten werden konnten.

Die vorliegende Studie soll als Teil einer erneuten Prüfung der Realisierbarkeit einer Fährverbindung vor allem die Wirtschaftlichkeit jener bewerten. Besonderer Fokus liegt hierbei auf den jüngsten Entwicklungen der angebundenen Regionen, den relevanten Hafenstrukturen und den Anforderungen an die Schifffahrt.

Auch für Verkehre auf Binnenwasserstraßen sind zunehmend stringentere Vorgaben zur Emissionsreduzierung zu erwarten, was den Handlungsdruck erhöht, alternative Kraftstoffe oder/und Antriebssysteme zum Einsatz zu bringen. Die Wirtschaftlichkeit der Fährverbindung wird daher insbesondere unter dem Aspekt des Einsatzes alternativer Kraftstoffe und damit verbundener neuer Bereitstellungsstrukturen analysiert.

2. Ausgangslage

2.1 Verkehrsgebiet und Routenverlauf der Fährverbindung

2.1.1 Straßenverbindung

Verkehre von Straßenfahrzeugen zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel werden gegenwärtig i. d. R. über die Fährverbindung zwischen Glückstadt und Wischhafen (siehe Kapitel 2.1.3) oder durch bzw. um Hamburg geleitet. Bis Hamburg werden ab Cuxhaven in der Regel die B 73 und BAB 26 oder die BAB 27 und BAB 1 genutzt. Zwischen Hamburg und Brunsbüttel bieten im überregionalen Straßennetz die BAB 7 mit der BAB 23 und der B 5 die schnellsten Verbindungen. Die Distanz auf der Straße variiert damit zwischen etwa 200 und fast 300 km. Bei einer für Schwerlastverkehre unterstellten Durchschnittsgeschwindigkeit von 60 km/h beträgt die Fahrtzeit damit zwischen 3,3 und 4,7 h (ohne Lenkzeitunterbrechung).

Das Befahren des Elbtunnels der BAB 7 bei Hamburg durch Beförderungseinheiten von gefährlichen Gütern des Buchstabens C ist nicht gestattet. Transporte von gefährlichen Gütern des Buchstabens E müssen zwischen 5:00 und 23:00 Uhr auf andere Strecken ausweichen [31]. Ausweichmöglichkeiten, wie z. B das großräumige Umfahren Hamburgs über die BAB 1, gehen für den Schwerlastverkehr mit einer zumeist signifikanten Steigerung der Transportdistanz und -zeit einher.

Eine zusätzliche feste Elbquerung ist Bestandteil der Planungen zum Bau der BAB 20 zwischen Bad Segeberg in Schleswig-Holstein und dem Autobahnkreuz Kehdingen bei Drochtersen in Niedersachsen zur BAB 26. Der geplante zweiröhrige Tunnel mit jeweils zwei Fahrstreifen soll zwischen Glückstadt und Drochtersen errichtet werden. Eine Fertigstellung wird gegenwärtig frühestens Anfang der 2030er Jahre erwartet.

2.1.2 Fährverbindung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel

Der Mündungsbereich der Binnenwasserstraße Elbe ist insbesondere durch die Schiffsverkehre der Häfen Hamburg, Stade-Bützfleth und Brunsbüttel sowie durch den Zugang zum Nord-Ostsee-Kanal (NOK), einem der am meist frequentierten maritimen Verkehrsbereiche weltweit, geprägt [09]. Lage und Verlauf der Fahrrinne der Elbe können Abbildung 1 entnommen werden.

Innerhalb dieses maritimen Verkehrsbereiches liegt die zu betrachtende Fährverbindung. Die Route erstreckt sich vom RoRo-Anleger am Steubenhöft im Hafen von Cuxhaven bis zum RoRo-Anleger auf schleswig-holsteinischer Seite, der etwa 2,6 km westlich des Zugangs zum NOK-Schleusenbereich installiert ist. Weitere Details zu den Anlegern sind Kapitel 2.3 zu entnehmen.

Die Auswertung der Schiffsbewegungsdaten der RoPax-Doppelendfähre ‚Greenferry 1‘ (IMO-Nr. 9344758) im Jahr 2021 sowie exemplarische Verkehre des Hochgeschwindigkeits-Katamarans ‚Halunder Jet‘ (IMO-Nr. 9825295) im Jahr 2024 verdeutlichen den gewählten Routenverlauf

zwischen beiden Standorten (siehe Kapitel 2.2). In beide Fahrtrichtungen nutzt der Fährverkehr den Hauptlauf der Elbe-Fahrrinne.

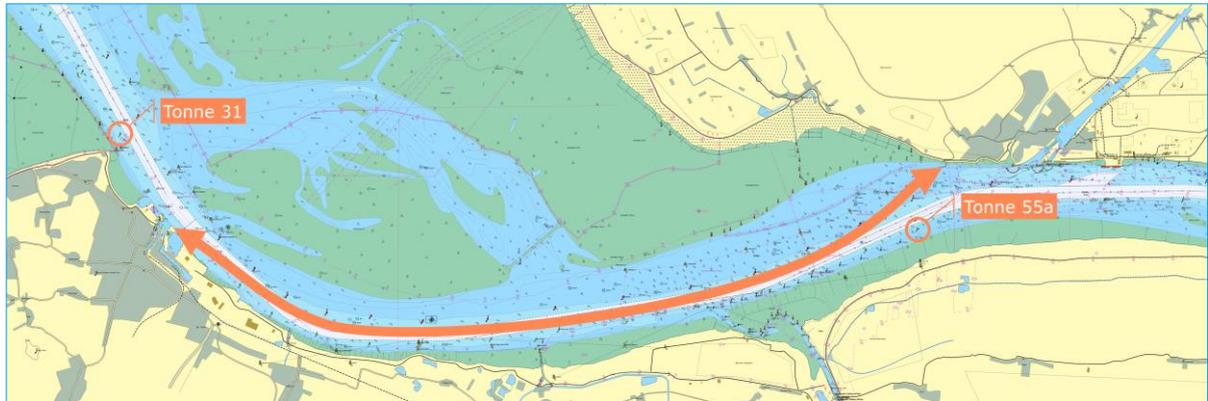


Abbildung 1 | Routenverlauf der Fährverbindung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel auf Basis der Schiffsbewegungen der ‚Greenferry 1‘ im Jahr 2021 und exemplarischer Schiffsbewegungen des ‚Halunder Jet‘ im Jahr 2024 [05]

Die Ansteuerung des RoRo-Anlegers bei Brunsbüttel erfolgt in der Regel westlich der Tonne 58 entlang der Grenze zwischen Neufeld-Reede Ost und der Nordwest-Reede. Auf niedersächsischer Seite erfolgt die Ansteuerung des RoRo-Anlegers etwa auf halber Entfernung zwischen den Tonnen 32b und 34. Die beiden Abschnitte markieren den Vor- bzw. Nachlauf außerhalb der Fahrrinne bei entsprechendem Flachwassereinfluss. Hieraus und aus den Ab- und Anlegemanövern an den RoRo-Anlegern ergibt sich für beide Abschnitte eine reduzierte Geschwindigkeit gegenüber dem Hauptlauf. Die mit dieser Route korrespondierende einfache Gesamtentfernung beträgt rund 27,4 km bzw. 14,8 sm [10].

Gemäß Seeschiffahrtstraßenordnung (SeeSchStrO) ist seit Januar 2019 für Schiffe ab 90 m Länge auf dem Streckenabschnitt der Elbe zwischen Tonne 31 und 55 a die Höchstgeschwindigkeit in beide Fahrtrichtungen auf 15 kn begrenzt (siehe Abbildung 1) [14]. Hierdurch sollen Gefährdungen durch Sog und Schwell vermieden werden. Bemessungsgrundlage für die Geschwindigkeit ist die Fahrt durchs Wasser (FdW). Als FdW gilt die Fahrt über Grund (FüG) zu-/abzüglich der tidebedingten Strömungsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung weiterer Parameter [11].

Bei Stauwasser entspricht $FdW = FüG$, gegen die Strömung $FdW = FüG +$ Strömungsgeschwindigkeit und mit der Strömung $FdW = FüG -$ Strömungsgeschwindigkeit. Dies bedeutet bei täglich mehreren Überfahrten je Richtung, dass die einfache Überfahrtszeit, gegenüber einem möglichen Tagesdurchschnittswert mit 15 kn FdW, gegen die Strömung tendenziell nach oben und mit der Strömung tendenziell nach unten abweichen kann.

Zudem müssen Schiffe mit mehr als 90 m Länge oder mehr als 13 m Breite in der Regel beim Befahren der Elbe mit einem Lotsen besetzt sein. Auf Antrag ist durch das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Elbe-Nordsee unter bestimmten Voraussetzungen eine Befreiung von der Lotsenannahmepflicht sowie der SeeSchStrO möglich [13].

2.1.3 Fährverbindung zwischen Glückstadt und Wischhafen

In etwa 30 km südlich von Brunsbüttel besteht aktuell eine von der FRS Helgoline GmbH & Co. KG betriebene Fährverbindung von Glückstadt nach Wischhafen. Die Fähre verkehrt in den Hauptverkehrszeiten alle 30 Min. Die Überfahrt dauert ca. 20 Min. Laut FRS Helgoline GmbH & Co. KG ist eine Umgestaltung der Elbfähre mit einer Kapazitätserweiterung um 600 % geplant. Gleichzeitig soll die Überfahrtszeit auf 14 Min. reduziert und die Fährverkehre emissionsfrei werden [30].

Die Distanz zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel für Straßenfahrzeuge beträgt mit Nutzung dieser Fährverbindung rund 80 km. Auf der gegenwärtigen Fährverbindung ist die Kapazität je Abfahrt für Beförderungseinheiten von gefährlichen Gütern limitiert. Die Einschränkung ergibt sich aus der Gefahrgut-Ausnahmereverordnung (GGAV) der Gefahrgutverordnung für die Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt. Ausnahme 33 (M) formuliert hier eine Mengengrenze von einer Beförderungseinheit mit gefährlichen Gütern. Aus der Verordnung ergeben sich zusätzliche Bestimmungen und vom Transport ausgenommene Klassen gefährlicher Güter [32]. Hierbei wird die Fähre als Binnenschiff klassifiziert.

2.2 Fährbetrieb und -schiffe

2.2.1 FRS Helgoline GmbH & Co. KG (seit 2024)

Aktuell besteht kein RoPax-Fährbetrieb zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel. Jedoch hat die FRS Helgoline GmbH & Co. KG mit dem Erwerb des RoRo-Anlegers bei Brunsbüttel (siehe Kapitel 2.3) den Standort zum April 2024 in den Fahrplan zwischen Hamburg und Helgoland aufgenommen. Von April und November verkehrt der Hochgeschwindigkeits-Katamaran ‚Halunder Jet‘ (IMO-Nr. 9825295) dreimal wöchentlich je Richtung zwischen der Kaianlage Alte Liebe im Vorhafen des Hafens Cuxhaven und dem RoRo-Anleger bei Brunsbüttel. Der ‚Halunder Jet‘ ist eine reine Personenfähre. Die Überfahrtszeit von Cuxhaven nach Brunsbüttel ist mit 40 Min., für die entgegengesetzte Richtung mit 35 Min. angegeben [12]. Exemplarische Schiffsbewegungen des ‚Halunder Jet‘ dokumentieren für den Hauptlauf der Route tideabhängig Geschwindigkeiten von etwa 29 – 35 kn FÜG [05].

2.2.2 Elbferry GmbH & Co. KG (2021)

Zuletzt kam auf der Fährverbindung die LNG-betriebene RoPax-Doppelendfähre ‚Greenferry 1‘ (IMO-Nr. 9344758) der Elbferry GmbH & Co. KG zum Einsatz. Abbildung 2 veranschaulicht den Routenverlauf der ‚Greenferry 1‘ im Jahr 2021. Der Fährbetrieb wurde im März 2021 aufgenommen und im Dezember 2021 mit der Insolvenz der Fährgesellschaft wieder eingestellt [06]. Insbesondere die Bunkerkosten haben unmittelbar nach der Aufnahme des Betriebes aufgrund steigender Handelspreise für Erdgas und damit auch für LNG (siehe Kapitel 3.3.4)

erheblich zugenommen. Ab September 2021 wurde ein Bunkerzuschlag erhoben, um die skizzierte Kostenentwicklung zu kompensieren.

Die 2007 gebaute Fähre ist eine von fünf typengleichen, rund 130 m langen Einheiten mit gas-elektrischem Antrieb [04]. Die Bebungung der Fähre mit LNG erfolgte durch Tanksattelaufleger mehrmals wöchentlich in den Abendstunden nach Fährbetriebschluss am Steubenhöft im Hafen von Cuxhaven. Der Kraftstoff wurde aus dem LNG-Importterminal der Fluxys LNG SA in Zeebrugge bezogen. Distributions- und Logistikkosten haben bei entsprechend großen Transportdistanzen einen erheblichen Einfluss auf den Bereitstellungspreis des Kraftstoffes [15].



Abbildung 2 | Schiffsbewegungen der ‚Greenferry 1‘ zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel im Jahr 2021 [08]

Im November 2023 wurde das Fährschiff zur Fiskerstrand Verft AS in Norwegen verholt. Dort wird es derzeit für den späteren Einsatz in Kanada Umbaumaßnahmen unterzogen, die u. a. die Umrüstung auf einen diesel-elektrischen Antrieb beinhalten [07].

Die einfache Überfahrtszeit der ‚Greenferry 1‘ war mit durchschnittlich 60 Min. kalkuliert. Je Richtung gab es vier- bis sechsmal täglich, alle drei Stunden, eine Abfahrt. Die hiermit korrespondierende Durchschnittsgeschwindigkeit im Hauptlauf beträgt 16 – 17 kn FÜG. Die zur Einhaltung des Fahrtaktes notwendige Befreiung der ‚Greenferry 1‘ von der in der SeeSchStrO verankerten Höchstgeschwindigkeit für Schiffe ab 90 m Länge (siehe Kapitel 2.1) wurde durch das WSA Elbe-Nordsee nach einer Testphase befristet ausgesprochen [13]. Eine erneute befristete Befreiung wäre auf Antrag möglich gewesen. Für die Testphase ergingen in diesem Zusammenhang Vorgaben zum Monitoring der Auswirkungen durch Sog und Schwell der Fähre auf die Uferstreifen und den weiteren Schiffsverkehr.

2.2.3 Elb-Link Fährgesellschaft mbH (2015 bis 2017)

Davor wurde die Fährverbindung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel durch die Elb-Link Fährgesellschaft mbH betrieben. Die Fährgesellschaft nahm den Betrieb im August 2015 auf [01]. Im November 2017 meldete die Elb-Link Fährgesellschaft mbH Insolvenz an und der Fährbetrieb wurde eingestellt [02]. Die Fährgesellschaft setzte auf der Route die RoPax-Doppelendfähren ‚Grete‘ (IMO-Nr. 9474060) und ‚Anne-Marie‘ (IMO-Nr. 9474072) ein [03]. Die 2010 gebauten

Schwesterschiffe sind rund 98 m lang und verfügen über einen Viertaktmotor bzw. diesel-elektrischen Antrieb [04]. Aktuell operieren die Fährschiffe an der Ostküste Kanadas [05].

Auf eine weiterführende Zusammenfassung der verschiedenen Vorhaben zur Etablierung einer Fährverbindung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel vor 2015 soll aufgrund der geringen Relevanz für den aktuellen Studienzweck verzichtet werden.

2.3 Merkmale der RoRo-Anleger

2.3.1 Cuxhaven

Der RoRo-Anleger auf niedersächsischer Seite befindet sich am Steubenhöft im Hafen von Cuxhaven (siehe Abbildung 3). Es handelt sich um eine aufgeständerte Rampenanlage mit Betonfahrbahn und Dalben. Die Zufahrt erfolgt über eine unmittelbar südwestlich des RoRo-Anlegers befindliche Vorstau- bzw. Aufstellfläche für Fahrzeuge. Eigentümer der 2002 errichteten RoRo-Rampe ist die Cuxport GmbH [03]. Alle weiteren hafeninfrastrukturellen Anlagen am Steubenhöft sind Eigentum der Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG.

Anfang 2023 erfolgten Anpassungsarbeiten an der RoRo-Rampe sowie der Rückbau u. a. von Führungsdalben am Anleger. Die Anpassungen wurden im Zuge der temporären Abfertigung der RoPax-Kreuzfahrtfähre ‚Romantika‘ (IMO-Nr. 9237589) der Holland Norway Lines BV durchgeführt. Die rund 193 m lange Kreuzfahrtfähre verkehrte im April und Mai 2023 dreimal wöchentlich ab Cuxhaven in Richtung Kristiansand in Südnorwegen [17].

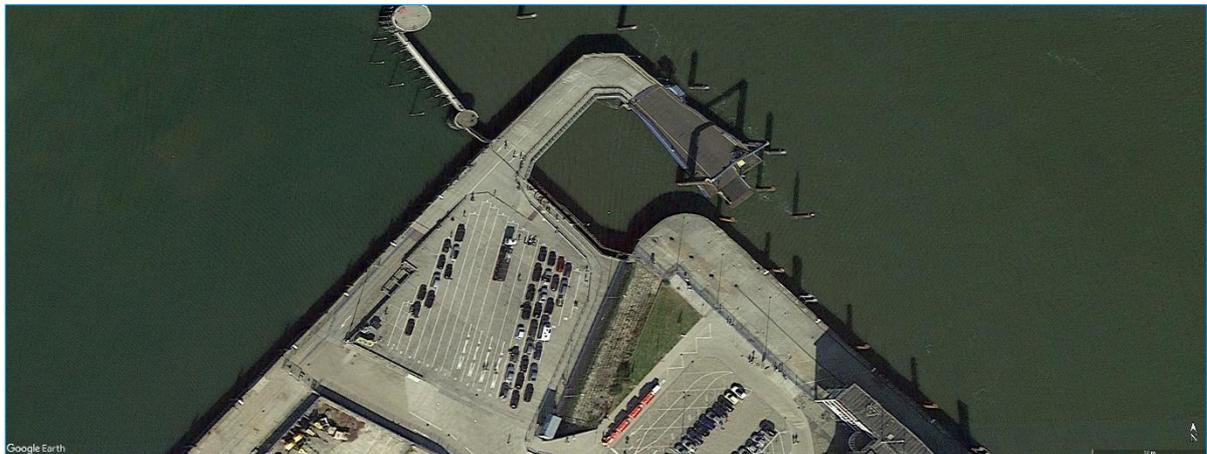


Abbildung 3 | RoRo-Anleger am Steubenhöft und Vorstaufläche im Hafen von Cuxhaven im Jahr 2016 [16]

Die Liegeplatz- und Abfertigungskapazitäten am Steubenhöft werden aktuell wiederkehrend durch Kreuzfahrtschiffe genutzt. Unter anderem eine weitere Steigerung der Anzahl von Anläufen durch Kreuzfahrtschiffe sowie die mögliche Abfertigung zunehmend größerer Schiffseinheiten am Steubenhöft könnte der Nutzung des RoRo-Anlegers durch einen erneuten hochfrequenten Fährbetrieb am gegenwärtigen Standort entgegenstehen [03].

2.3.2 Brunsbüttel

Der im Jahr 1999 erbaute RoRo-Anleger bei Brunsbüttel wurde 2024 durch die FRS Helgoline GmbH & Co. KG erworben und für die Abfertigung des ‚Halunder Jet‘ angepasst (siehe Kapitel 2.2.1). Die Möglichkeit zur Nutzung der RoRo-Rampe durch Fahrzeuge bleibt dabei erhalten [12]. Der RoRo-Anleger ist über die Straße ‚Zum Elbdeich‘ und die vorgelagerte Vorstau- bzw. Aufstellfläche für Fahrzeuge sowie über einen separaten Fußgängerweg erreichbar (siehe Abbildung 4).

Den Bereich hinter dem Landesschutzdeich nutzt die FRS Helgoline GmbH & Co. KG u. a. als Parkplatz für Fahrgäste und den Fahrkartenverkauf. Ein ergänzender Nutzungsvertrag mit dem Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN) regelt die Bedingungen zur Querung des Landesschutzdeiches. Im Rahmen des Vertrages werden für die Nutzung von Teilflächen des Landesschutzdeiches als Zu- und Abfahrt sowie als Wartebereich Entgelte festgelegt, die durch den Nutzer zu entrichten sind.

Der Fahrplan des ‚Halunder Jet‘ sieht eine Belegung des RoRo-Anlegers bei Brunsbüttel gegenwärtig lediglich dreimal wöchentlich für 15 Min (in Richtung Helgoland) und dreimal wöchentlich für 5 Min (in Richtung Hamburg) vor. Während der Liegezeit erfolgt ausschließlich der Aus- und Zustieg von Passagieren. Nutzungseinschränkungen für einen RoPax-Fährbetrieb zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel scheinen hieraus nicht unmittelbar zu ergeben. Bauliche Unverträglichkeiten am RoRo-Anleger zwischen beiden Schiffstypen sind weiterführend zu prüfen.



Abbildung 4 | RoRo-Anleger und Vorstaufläche bei Brunsbüttel im Jahr 2016 [16]

2.4 Klimapolitische Zielsetzungen

Neben nautischen Restriktionen und Anforderungen durch die zu erfüllende Transportaufgabe setzen die globalen, kontinentalen und nationalen Klimaziele, zu denen sich die EU und Deutschland bekannt haben, Rahmenbedingungen zur Treibhausgas-Intensität (THG) eines Transportes auf der Fährverbindung.

Sowohl die IMO als auch die EU haben Ziele zur Reduzierung der THG-Emissionen gesetzt, die sich u. a. auf das Kraftstoffportfolio der Schifffahrt auswirken werden. 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-THG-Emissionen um 20 % bis 2030, 70 % bis 2040 bzw. 100 % um das Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2008 an. Diese Ziele sind nicht an die Eigenschaften des Kraftstoffs gebunden. Auch designtechnische, operative und ökonomische Maßnahmen zur Erhöhung der Transporteffizienz bzw. Einsparung von Emissionen sind gangbare Optionen zur Erreichung der Ziele. 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 festgelegten Ziele der EU auf das CO₂-Äquivalent des Kraftstoffs beziehen. Die EU sieht eine Reduzierung der Well-to-Wake-THG-Emissionen des Kraftstoffs um 6 % bis 2030, 31 % bis 2040 bzw. 80 % bis 2050 gegenüber dem Flottendurchschnitt des Jahres 2020 vor.

Auf Binnenwasserstraßen gelten die Ziele der EU für den kontinentalen Verkehrssektor als übergeordnetes Ziel. Bindend für die Binnenschifffahrt sind daher die vereinbarten Vorgaben des EU Green Deals. Dieser sieht eine Reduktion der THG-Emissionen des Verkehrssektors bis 2050 um 90 % gegenüber 1990 vor.

Darüber hinaus wurde 2018 die so genannte ‚Mannheimer Erklärung‘ formuliert. Diese hat zum Ziel, die von der EU formulierte strategische Vision für ein klimaneutrales Europa bis 2050 auf die deutsche Binnenschifffahrt zu übertragen. Im Rahmen der Erklärung wurden die Ziele von 35 % Reduktion der durch die Binnenschifffahrt verursachten THG 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.

Die Zulassung und die technischen Details der Nutzung von (alternativen) Kraftstoffen in der Binnenschifffahrt werden für die deutschen Binnenwasserstraßen vor allem durch den Europäischen Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe (ES-TRIN) des Europäischen Ausschusses zur Ausarbeitung von Standards im Bereich der Binnenschifffahrt (CESNI) geregelt. Er enthält bereits Anforderungen an die Nutzung von LNG und soll zukünftig um weitere Alternativen, wie z. B. Methanol, für das der Prozess zur Implementierung bereits fortgeschritten ist, erweitert werden.

Ebenso sind für LNG entsprechende Richtlinien in der Seeschifffahrt etabliert und für die Nutzung von Methanol als Kraftstoff liegt eine *Interim Guideline* vor. Die Entwürfe von Richtlinien für

Wasserstoff und Ammoniak befinden sich noch in der Erarbeitung und sind kurzfristig nicht zu erwarten. Schiffe mit einem solchen Kraftstoffsystem müssen daher aktuell immer individuell entsprechend des so genannten *Alternative Design Approach* klassifiziert werden, was sehr zeit- und kostenaufwendig ist.

Die CO₂-Minderungsziele sowohl von der EU als auch der IMO sollen bis zum Jahr 2050 umgesetzt werden. Eine Auslegung als Seeschiff wird angestrebt (siehe Kapitel 2.6). Der Verkehrsabschnitt unterliegt der SeeSchStrO (siehe Kapitel 2.1.2).

2.5 Flotte von RoPax-Fähren

Die weltweite Flotte von seegängigen Schiffen mit dem Typenattribut ‚Pass./Car Catamaran Vessel‘, ‚Pass./Car Ferry‘ oder ‚Ro-Ro Freight/Passenger‘ beläuft sich aktuell auf 3.606 Einheiten [04]. Hiervon sind 95 Schiffseinheiten noch im Bau. Weitere zehn Einheiten sind (dauerhaft) aufgegeben, beschädigt oder festgesetzt.

Die verbleibenden 3.501 Schiffseinheiten sind aktuell in Fahrt, temporär beschäftigungslos oder aufgelegt, sowie für Umrüstungen und Reparaturen in Werften. Für 3.391 Einheiten ist die Gesamtlänge des Schiffes bekannt. 570 Einheiten hiervon haben eine Schiffslänge zwischen 70 und 90 m (siehe Kapitel 2.1).

Für 405 der 570 RoPax-Schiffseinheiten sind Angaben zur Maximalgeschwindigkeit verfügbar.

Insbesondere unter Berücksichtigung der Ausführungen in Kapitel 2.2.2 zu möglichen Strömungsgeschwindigkeiten auf der Elbe und den gegenüber des Hauptlaufs reduzierten Geschwindigkeiten in den Abschnitten des Vor- und Nachlaufes, einer tagesdurchschnittlich maximal einstündigen Überfahrtszeit, sowie von Leistungsreserven für Manöver und Verspätungen erscheint eine Maximalgeschwindigkeit von mindestens 22 – 23 kn erforderlich. 59 Schiffseinheiten erfüllen diese Mindestanforderung. Bei der Mehrzahl der 59 Schiffseinheiten handelt es sich um Hochgeschwindigkeits-Katamarane, die über eine Maximalgeschwindigkeit von 30 kn und mehr verfügen.

Lediglich vier der 59 Schiffseinheiten sind als Doppelendfähren konzipiert. Doppelendfähren verfügen (in der Regel) über eine identische Bug- und Heckform sowie identische Propulsionsanlagen an beiden Schiffsenden. Hierdurch wird in beide Fahrrichtungen eine identische Manövrierbarkeit gewährleistet. Zudem verfügen Doppelendfähren sowohl an Bug als auch Heck über (identische) Rampenkonstruktionen. Damit können sowohl Wendemanöver der Fähren am Anleger als auch der Fahrzeuge an Bord, während der Be- und Entladevorgänge, vermieden werden. Der Zeitaufwand für das An- und Ablegen und den Ladungswechsel wird hierdurch auf ein Minimum reduziert.

Eine genaue Ermittlung der Transportkapazitäten der verbliebenen vier Schiffseinheiten sowie ihrer Eignung für Schwer- und Gefahrguttransporte erfolgte nicht. Eine erste visuelle Überprüfung von Schiffsbildern lässt jedoch vermuten, dass die Einheiten auch aufgrund ihres Aufbaus über

eine geringere Transportkapazität verfügen als die in Kapitel 2.2 betrachteten RoPax-Doppelendfähren.

Ungeachtet einer Marktverfügbarkeit der vier Einheiten, ist die Wahrscheinlichkeit, innerhalb der bestehenden Flotte eine technisch umfänglich geeignete RoPax-Doppelendfähre zu identifizieren, als eher gering einzuschätzen. Dies schließt explizit die Ausstattung mit Azipod-Antrieben für die Manövrierbarkeit, die Verfügbarkeit einer Mindesttransportkapazität, etc. ein.

Im Falle eines Schiffsneubaus ist der mögliche Beschaffungszeitraum zu berücksichtigen. In diesen fallen u. a. die Konzeptentwicklungs- und Designphase, die Vorbereitung und Durchführung der Ausschreibungs- und Angebotsphase, die Vertragsverhandlungen sowie die Ausführungs- und Abnahmephase. Die genannten Prozessschritte können zusammen mehrere Jahre in Anspruch nehmen.

2.6 Zwischenfazit

1. Eine Fährverbindung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel dient der zielgerichteten Ergänzung der Alternativen zur Querung der Elbe im Verkehrsgebiet. Dies gilt im Allgemeinen für touristische Verkehre sowie den Werks- und Schwerlastverkehr, insbesondere jedoch für den Transport gefährlicher Güter. Die Auslegung als Seeschiff ist Grundvoraussetzung für eine ausreichende Transportkapazität gefährlicher Güter.
2. Die Nutzung der RoRo-Anleger bzw. der sich anschließenden Hafenanlagen auf beiden Elbseiten für einen erneuten hochfrequenten Fährbetrieb erscheint unter gegenwärtigen Bedingungen grundsätzlich möglich. Einschränkungen könnten sich in Cuxhaven durch eine Ausweitung des Kreuzfahrttourismus ergeben. Die Kosten für die Nutzung von Anlegern sowie die Querung von Deichen (in SH) sind dabei nicht zu unterschätzen. Spielraum diesbezüglich müsste mit den Eigentümern sowie Landeseinrichtungen erörtert werden.
3. Die klimapolitischen Zielsetzungen erfordern die Berücksichtigung alternativer Antriebs- bzw. Kraftstoffkonzepte für eine Fährverbindung. Erste Erfahrungen sowie die Voraussetzungen zur Bebunkerung von Schiffen mit alternativen Kraftstoffen sind auf beiden Elbseiten vorhanden.
4. Eine Gesamtlänge der Fähre von maximal 90 m ermöglicht einen Betrieb ohne zusätzliche Auflagen. Die Wahrscheinlichkeit, innerhalb der bestehenden Flotte eine technisch und kommerziell umfänglich geeignete RoPax-Doppelendfähre zu identifizieren, ist als eher gering einzuschätzen. Die Möglichkeit, eines auf den Routenverlauf angepassten Schiffsneubaus ist zu erwägen. Hierbei sind ein entsprechender Beschaffungszeitraum und die Klassifizierung als Seeschiff zu berücksichtigen. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Beschaffung eines Bestandsschiffes mit niedrigeren CapEx einhergeht als ein Schiffsneubau.

Kurzfristig bleibt die Aufnahme des Fährbetriebes mit einem Bestandsschiff möglich, jedoch unter Abwägung der einzugehenden betrieblichen Kompromisse. Bei einer potenziellen Wiederaufnahme des Fährbetriebs mit einer auf der Fährverbindung bereits erprobten Doppelendfähre kann von Erfahrungswerten profitiert werden.

5. Für den Neubaufall kann zunächst ein Einschiffbetrieb berücksichtigt werden, sofern eine durchschnittliche Überfahrtszeit von unter einer Stunde gewährleistet ist.

3. Alternative Kraftstoffoptionen

Im gesamten See- und Binnenschifffahrtssegment sind in den letzten Jahren, bewirkt durch die forcierten Defossilisierungsmaßnahmen, viele technologische Entwicklungen für Schiffsbunker- und -antriebssysteme zu verzeichnen, die den Einsatz alternativer Kraftstoffe ermöglichen sollen. Viele dieser Technologien befinden sich jedoch noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase. Auch Erzeugungs-, Import- und Bunkerstrukturen für alternative Kraftstoffe sind bisher nur vereinzelt vorhanden. Viele Projekte befinden sich derzeit noch auf dem Planungsniveau von Machbarkeitsstudien.

Eine neue Fährverbindung zwischen Brunsbüttel und Cuxhaven sollte bereits in der Planung so ausgelegt werden, dass sie den künftigen Anforderungen an deutlich verminderte Schadstoffemissionen gerecht wird. Da eine Etablierung einer Fährverbindung jedoch kurz- bis mittelfristig und nicht erst langfristig geprüft werden soll, gilt es im Spannungsfeld zwischen bereits verfügbaren Strukturen und Technologien für den Einsatz alternativer Kraftstoffe und den langfristigen Anforderungen an den Schiffsverkehr, ein realistisches und wirtschaftlich tragbares Kraftstoffsystem zu wählen.

3.1 Vorauswahl Kraftstoffportfolio

Die derzeit unterschiedlichen diskutierten Kraftstoffoptionen für die Schifffahrt unterscheiden sich sowohl in ihren chemisch-physikalischen Eigenschaften als auch in ihrer Marktverfügbarkeit sowie in der Marktreife der notwendigen Technologien. Die in Abbildung 5 dargestellten ‚Key Critical Factors‘ veranschaulichen, welche Entscheidungskriterien die Kraftstoffauswahl für eine zukünftige Fährverbindung und damit auch die Auswahl des Fährschiffes und der Bereitstellungsanlagen und -logistik sowie den wirtschaftlichen Betrieb einer Fähre beeinflussen.

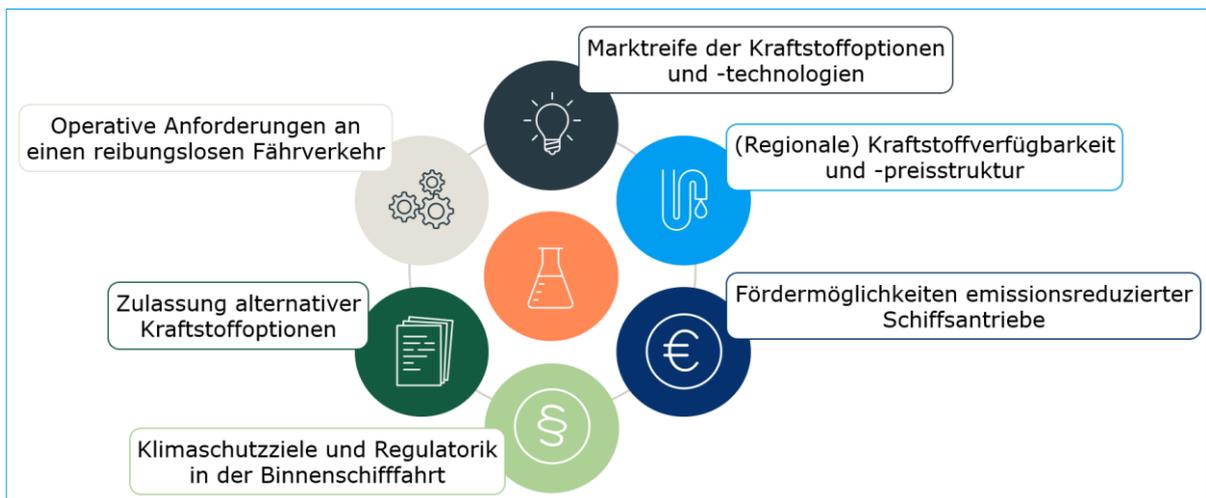


Abbildung 5 | Key Critical Factors für die Vorauswahl von Kraftstoffen

Das grundsätzlich zur Verfügung stehende Kraftstoffportfolio zeigt, wie Abbildung 6 verdeutlicht, ein sehr heterogenes Bild aus etablierten fossilen Kraftstoffen sowie alternativen Kraftstoffen, die sich zum einen aus Wasserstoff und dessen Derivat Ammoniak und Methanol sowie zum anderen aus (biologisch oder synthetisch erzeugtem) Erdgas, Autogas und der Direktnutzung von Strom zusammensetzen. Auch die Nutzung von weiteren E-Fuels, wie z. B. E-Diesel ist möglich. Unter dem Überbegriff ‚Erdgas‘ werden im Rahmen der vorliegenden Studie Kraftstoffe mit einem Methangehalt von mindestens 96 % zusammengefasst.

Um gerade gasförmige Kraftstoffe raumeffektiv zu speichern, können sie teilweise in unterschiedlichen Aggregatzuständen und Komprimierungsstufen an Land und an Bord vorgehalten werden. So sind Erdgas und Wasserstoff sowohl unter Druck komprimiert („C“) oder auch kryogen, und damit in flüssiger Form („L“) relevante Optionen. Auch für Ammoniak sind beide Optionen möglich, deutlich häufiger werden jedoch kryogene Speichersysteme eingesetzt.



Abbildung 6 | Maritimes Kraftstoffportfolio

Die vorliegende Studie fokussiert schwerpunktmäßig die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der unter dem Begriff ‚alternative Kraftstoffe‘ zusammengefassten Kraftstoffoptionen. Um die aus diesem Portfolio relevanten Optionen weiter schärfen zu können, werden nachfolgend vertiefend Auswahlkriterien beleuchtet, die für die Eignung der Kraftstoffe für den Einsatz auf einer Fähre entscheidend sind.

3.2 Grundlegende stoffliche Eigenschaften alternativer Kraftstoffe

Die nachstehende Tabelle 1 listet ausgewählte stoffliche Eigenschaften herkömmlicher und alternativer Schiffskraftstoffe. Sie bestimmen maßgeblich mögliche sicherheitsrelevante Auswirkungen des Einsatzes der Kraftstoffe, die resultierenden Anforderungen an (Arbeits-) Sicherheitsmaßnahmen sowie den Umgang mit Störfällen. Aber auch die Materialverträglichkeit sowie die Anforderungen an ein Tank- und Antriebssystem sowie die landseitige Bereitstellung werden durch die stofflichen Eigenschaften bestimmt.

Die Gefahrstoffetiketten gemäß GHS-Verordnung weisen auf giftige und gesundheitsgefährdende Stoffe hin. Insbesondere Methanol und Ammoniak fallen hier durch die Kennzeichnung als ‚akut toxisch‘ und ‚ätzend‘ auf. Der Kontakt mit Ammoniak ist aufgrund seiner ätzenden Eigenschaft ohne entsprechende Sicherheitsvorkehrungen wie z. B. Schutzkleidung, ebenso wie ein unkontrollierter Austritt unbedingt zu vermeiden, was das Handling deutlich erschwert. Zudem sind alle alternativen Kraftstoffe im Gegensatz zu den herkömmlichen Kraftstoffen als explosiv

gekennzeichnet. Der Blick auf die Explosionsgrenzen in Vol.-%, die angeben ab welcher Konzentration ein Kraftstoff-Luft-Gemisch als explosiv gilt, zeigt, dass diese Schwelle vor allem für Wasserstoff und Erdgas bereits bei geringen Anteilen erreicht wird. Ein Wasserstoff-Luft-Gemisch ist zudem über eine große Gemisch-Spannweite hinweg explosiv. Auch der Einsatz explosiver Stoffe bedarf erhöhter Sicherheitsanforderungen. So müssen z. B. Zündquellen unbedingt vermieden werden.

Für den Einsatz als Kraftstoff sind zudem die Energiedichten von besonderem Interesse. Hier fällt insbesondere auf, dass die volumetrische Energiedichte [MWh/m^3] aller alternativen Kraftstoffe deutlich unter den Werten herkömmlicher fossiler Kraftstoffe liegt. So weist MDO (*Marine Diesel Oil*) eine volumetrische Energiedichte von $10,63 \text{ MWh/m}^3$ auf, wohingegen LNG bei $6,25 \text{ MWh/m}^3$ und komprimierter Wasserstoff (C-H_2) nur noch bei $1,4 \text{ MWh/m}^3$ liegt. In der Folge sind, um die gleiche Energiemenge wie herkömmliche fossile Kraftstoffe bereitstellen zu können, deutlich größere volumetrische Mengen alternativer Kraftstoffe notwendig. Nicht nur die an Bord mitzuführende Kraftstoffmenge und damit das benötigte Tanksystem werden daher voraussichtlich größer, sondern auch die Bunkerfrequenz und die damit verbundenen landseitigen Bereitstellungs- und Speichersysteme müssen den erhöhten Bedarfen gerecht werden.

Da eine Fähre für den dauerhaften Personenverkehr eingesetzt wird, sind mögliche Sicherheitsrisiken für die zivile Bevölkerung in besonderem Maße so gering wie möglich zu halten. Ammoniak ist daher aufgrund der stark toxischen und ätzenden Wirkung unter Anbetracht von Sicherheitsaspekten als ungünstige Kraftstoffwahl zu bewerten. Auch Wasserstoff sollte aufgrund der erhöhten Explosionsgefahr unter sicherheitstechnischen Aspekten nicht priorisiert empfohlen werden. Einige Pilotprojekte zeigen jedoch, dass für den Einsatz von Wasserstoff auf Fähren das geforderte Sicherheitsniveau ausreichend gewährleistet werden kann.

	HFO	MGO	MDO	Erdgas (min 96 % Methan)		Methanol	Ammoniak	Wasserstoff		
Eigenschaften				verflüssigt	komprimiert		verflüssigt	komprimiert	verflüssigt	komprimiert
Aggregatzustand	Flüssig (1 bar, 25°C)	Flüssig (1 bar, 25°C)	Flüssig (1 bar, 25°C)	Flüssig (1 bar, -163°C)	Gasförmig (200 bar, 25°C)	Flüssig (1 bar, 25°C)	Flüssig (1 bar, -33°C) ¹	Gasförmig (13 bar, 25°C)	Flüssig (1 bar, -252°C)	Gasförmig (700 bar, 25°C)
Energiedichte [MWh/m³]	11,11	10,65	10,63	6,25	2,50	4,38	3,62	3,12	2,37	1,4
Heizwert [MWh/t]	11,22	11,83	11,81	13,89	13,89	5,53	5,17	5,17	33,33	33,33
Dichte [t/m³]	0,990	0,90	0,90	0,45	0,18	0,79	0,70	0,60	0,07	0,04
Flammpunkt bei 1 bar [°C]	>60	>43 (DMX) >60 (weitere)	>60	-187 bis -135	-187 bis -135	11	-	-	-	-
Zündtemp. bei 1 bar [°C]	250	250	250	595	595	455	630	630	465	465
Exp.-Grenzen [Vol.-%]	-	-	-	4,4 - 16,5	4,4 - 16,5	6,0 - 36,0	15,4 - 33,6	15,4 - 33,6	4,0 - 76,0	4,0 - 76,0
GHS-Kenn- zeichnung										
	leicht entzündlich	reizend	umweltgefährlich	schädlich	verdichtete Gase	akut toxisch	ätzend			

Tabelle 1 | Typische stoffliche Eigenschaften herkömmlicher und alternativer Schiffskraftstoffe

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

3.3 Kraftstoffoptionen

3.3.1 (Synthetischer) Diesel

3.3.1.1 Eigenschaften

Als E-Diesel wird Diesel bezeichnet, der synthetisch auf Basis von Strom (PtL – Power to Liquid) hergestellt wird. Dabei wird aus erneuerbar erzeugtem Wasserstoff und CO₂ Synthesegas erzeugt, welches im Fischer-Tropsch-Verfahren u.a. zu synthetischem Diesel umgewandelt wird. Dieses Verfahren ist bereits lange etabliert. Eine Hürde stellt aktuell die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse in ausreichenden Mengen sowie die Nutzung von klimaneutralen Kohlenstoffquellen dar. Bei der Herstellung von synthetischem Diesel aus biogenen Quellen wird von Bio-Diesel gesprochen. Es ist fraglich ob für einen deutlichen Markthochlauf von biogen erzeugtem Diesel ausreichend ‚Grundmasse‘ zur Verfügung steht. Hierfür kommen z. B. Pflanzen, Gülle, Klärschlamm, Speiseabfälle etc. in Frage. Zur Unterstützung des Markthochlaufes synthetischer Dieselmotoren kann Bio-Diesel jedoch eine wichtige Funktion zukommen.

Für synthetisch und biogen erzeugten Dieselmotoren liegt eine eigene Norm, die DIN EN 15940, vor. Da diese Norm bisher noch nicht in der 10. BImSchV verankert war, durfte synthetischer Diesel nicht als Reinkraftstoff an öffentlichen Tankstellen angeboten werden. Er war jedoch als Blendkomponente bereits zulässig. Im März 2024 wurde die Zulassung von reinem paraffinischem Diesel (synthetischer + biogener Diesel) durch Bundestag und Bundesrat beschlossen, sodass bereits in Q2 2024 mit ersten Angeboten an Tankstellen gerechnet werden kann [\[18\]](#).

Synthetischer Diesel weist ähnliche Kraftstoffeigenschaften wie herkömmlicher Diesel auf. Aus technologischer Sicht spricht einem vollumfänglichen Einsatz daher nichts entgegen. Er kann zudem ohne Einschränkungen mit herkömmlichem Diesel gemischt werden, was als deutlicher Vorteil zu werten ist, da bis zur ausreichenden Verfügbarkeit von synthetischem Dieselmotoren über eine Beimischung bereits Emissionen reduziert und eine Teilklimaneutralität im Verkehrssektor bewirkt werden kann. Bei der Verbrennung von synthetischem Diesel entstehen im Vergleich zu konventionellem Dieselmotoren zudem weniger Emissionen.

Die bestehenden logistischen Strukturen für Dieselmotoren können zukünftig ohne Anpassungsmaßnahmen für die Bereitstellung von synthetischem Diesel genutzt werden. Auch sind das Handling und die zu ergreifende Sicherheitsmaßnahmen gut bekannt und etabliert.

3.3.1.2 Referenzpreisindizes

Der Referenzpreisindex stellt eine preisliche Entwicklung innerhalb eines Zeitraumes dar. Hinsichtlich dieser Eigenschaft wurden die Indizes in diesem Kapitel genutzt, um die Preisentwicklung des Kraftstoffes vorzustellen. Diese Überlegung steckt hinter allen in dieser Studie folgenden Referenzpreisindizes.

Die folgende Abbildung stellt den zeitlichen Preisverlauf in USD/t von LSMGO am Beispiel von Rotterdam dar. Im März 2022 gab es starke Preisschwankungen. Zu Beginn des Monats betrug der Preis für eine Tonne LSMGO 1.313 USD und am 15. März ist der Preis auf 993 USD/t gefallen. Am 7. Juni 2022 hat der Preis mit 1.374 USD/t für LSMGO den höchsten Stand erreicht. Anschließend ist der Preis gesunken. Einen weiteren preislichen Höhepunkt gab es am 14. September 2023 mit 992 USD/t, daraufhin sank der Preis erneut und am 11. April 2024 kostete dieser Kraftstoff 807 USD/t. Durchschnittlich beträgt der Preis für LSMGO 841 USD/t.

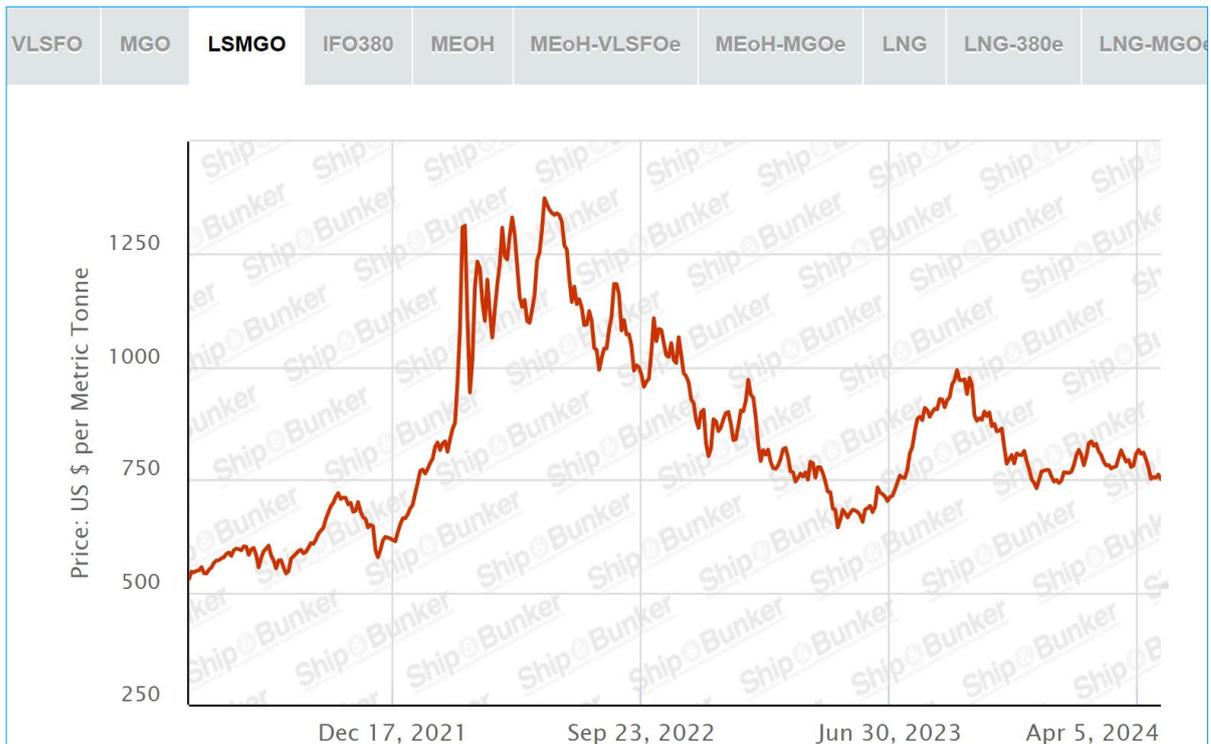


Abbildung 7 | Referenzpreisindex für fossiles LSMGO in Rotterdam von 2021 bis 2024 [20]

Die folgende Grafik stellt den Referenzpreisindex für Biodiesel in USD/mmBTU (USD/million British thermal units) dar. 1 mmBTU entspricht 26,4 Standard Kubikmeter Gas, welches auf einem Energiegehalt von 40 MJ/m³ basiert. Mithilfe dieser Einheit wird der Erdgaspreis an der Börse gehandelt. In der Grafik wird der Biodieselpreis aus fünf verschiedenen Regionen von 2022 bis 2024 verglichen. In China ist der USD/mmBTU im Jahr 2022 am höchsten, aber sinkt in den folgenden Jahren. In der ARA-Region schwankt der Preis. Den Höchstwert hat der Preis von ca. 55 USD/mmBTU im Juli 2022 erreicht. Das momentane Preisniveau liegt unter 40 USD/mmBTU.

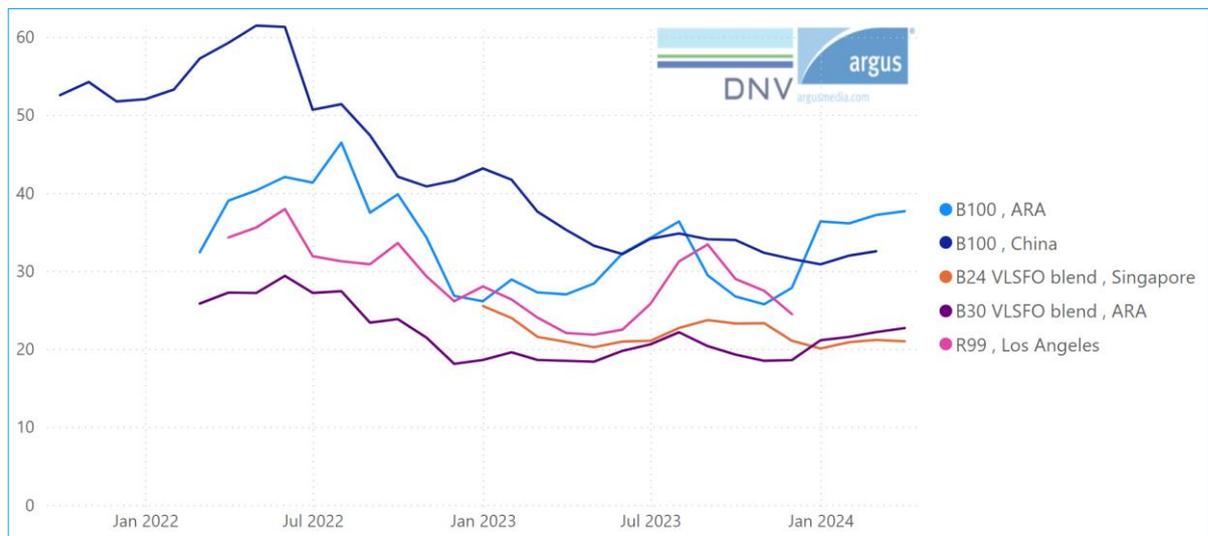


Abbildung 8 | Referenzpreisindex für Biodiesel in \$/mmbtu von 2022 bis 2024 [25]

3.3.2 Methanol

3.3.2.1 Eigenschaften

Methanol ist ein in der Chemieindustrie bereits lange etablierter und gut bekannter Stoff. Transport, Lagerung und Handling sind daher technologisch erprobt, jedoch nicht ausreichend verfügbar, um Methanol als Kraftstoff einzusetzen. Methanol lässt sich bereits heute klimaneutral als E-Methanol produzieren. Es bedarf aber eines deutlichen Ausbaus von Produktionskapazitäten.

Methanol emittiert bei der Verbrennung weniger Schadstoffe als Diesel oder Benzin. Der Einsatz von Katalysatoren reduziert die dennoch entstehenden Emissionen zusätzlich. Der Heizwert von Methanol beträgt ca. die Hälfte des Wertes von Diesel. Jedoch lassen sich mit Methanol-Verbrennungsmotoren leicht verbesserte Motorleistungen erzielen. Zudem wird auch der Einsatz von Methanolbrennstoffzellen zunehmend erforscht und erprobt bzw. kann Methanol als Energiespeicher für den Betrieb von Wasserstoffbrennstoffzellen genutzt werden.

Vereinzelt wird Methanol schon heute als Kraftstoff in der Schifffahrt eingesetzt. Zudem ist es bereits zulässig, geringe Mengen Methanol fossilem Ottokraftstoff beizumischen. Regulatorische- und Normungsverfahren für Methanol werden durch unterschiedliche Gremien und Institutionen bereits proaktiv auf den Weg gebracht (z. B. CESNI, ISO).

Methanol ist bei Umgebungstemperatur und atmosphärischem Druck flüssig und weist ähnliche Handling-Eigenschaften wie herkömmliche Kraftstoffe auf. Die Materialverträglichkeiten unterscheiden sich jedoch. Insgesamt ist dennoch die Nutzung in Dual-Fuel-Motoren möglich. Methanol weist Vorteile für Schiffssegmente auf, die sich für Retrofits eignen und/oder die flexibel auf den Markthochlauf alternativer Kraftstoffe reagieren müssen. Zudem ist die Marktreife von methanolbetriebenen gegenüber ammoniak- oder wasserstoffbetriebenen Schiffen heute als

deutlich vorgeschrittener zu bewerten. Eine große Herausforderung besteht aktuell aber noch darin, die in Methanol enthaltenen Kohlenstoffe aus klimaneutralen Kreisläufen zu generieren.

3.3.2.2 Referenzpreisindizes

Abbildung 9 stellt die Preise über einen Zeitraum von Mai 2021 bis April 2024 von Methanol in Rotterdam dar. Der Methanolpreis hatte sein höchstes Niveau am 14. Oktober mit 556 USD/t. Anschließend sinkt der Preis etwas, um dann erneut auf 521 USD/t zu steigen und direkt wieder zu sinken. Bis zum 14. Juli 2023 sinkt der Preis auf 231 USD/t, welches der geringste Wert in der betrachteten Zeitspanne ist. Anschließend steigt der Preis wieder und erreicht am 19. April 2024 345 USD/t. Durchschnittlich beträgt der Preis für Methanol 376 USD/t.

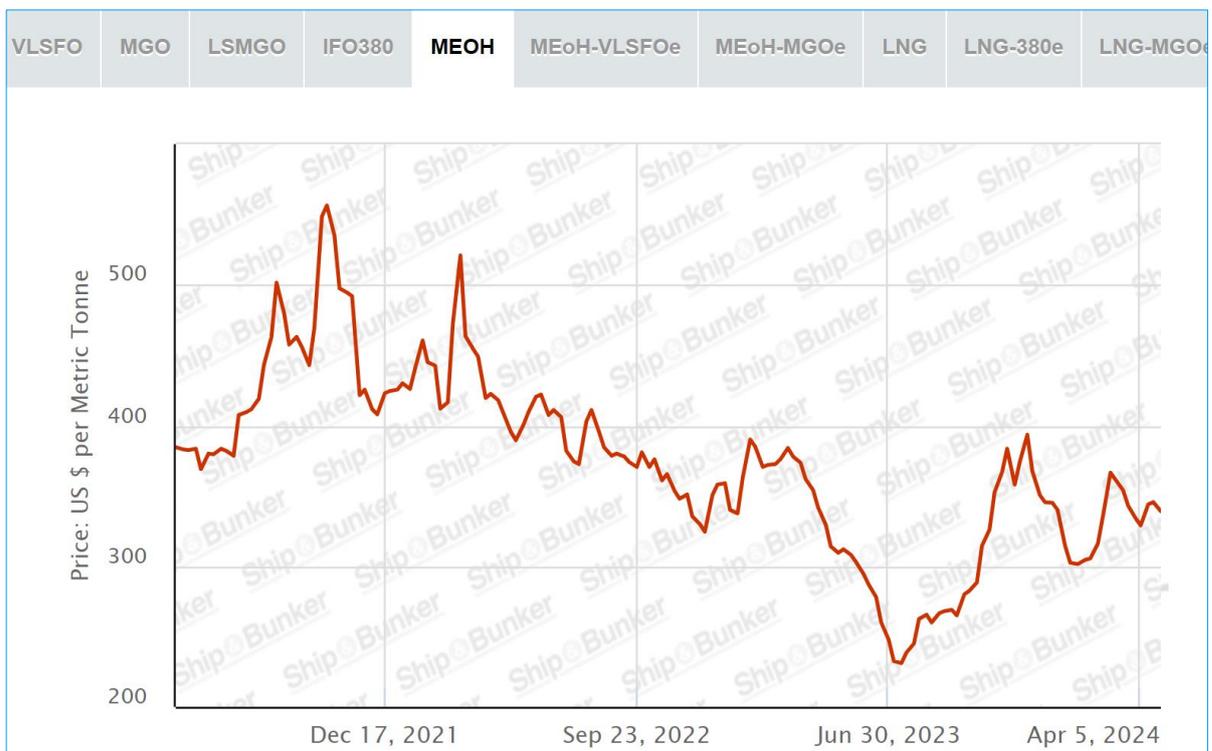


Abbildung 9 | Referenzpreisindex für fossiles Methanol in Rotterdam von 2021 bis 2024 [21]

In der folgenden Abbildung wird der Referenzpreisindex für Biomethanol für vier Regionen dargestellt. Die betrachtete Zeitspanne startet 2022 und endet 2024. Deutlich wird, dass Biomethanol aus der ARA-Region das höchste Preisniveau pro mmBTU aufweist. Im ersten Halbjahr 2022 ist der Preis für Biomethanol zunächst gestiegen. Seit Juli 2022 sinkt der Biomethanolpreis bis heute. Im Vergleich zum Verlauf des grauen Methanols ist Biomethanol signifikant teurer. Das graue Methanol befindet sich immer um 20 USD/mmBTU, wohingegen das Biomethanol bei über 80 USD/mmBTU im betrachteten Zeitraum gestartet ist und im Jahr 2024 etwas unter 60 USD/mmBTU liegt. Folglich ist der Preis für graues Methanol generell geringer als

der Preis für Biomethanol. Allerdings sinkt der Preis für Biomethanol im Verlauf der letzten Jahre, sodass die Preisdifferenz zwischen bio und grau sinkt.

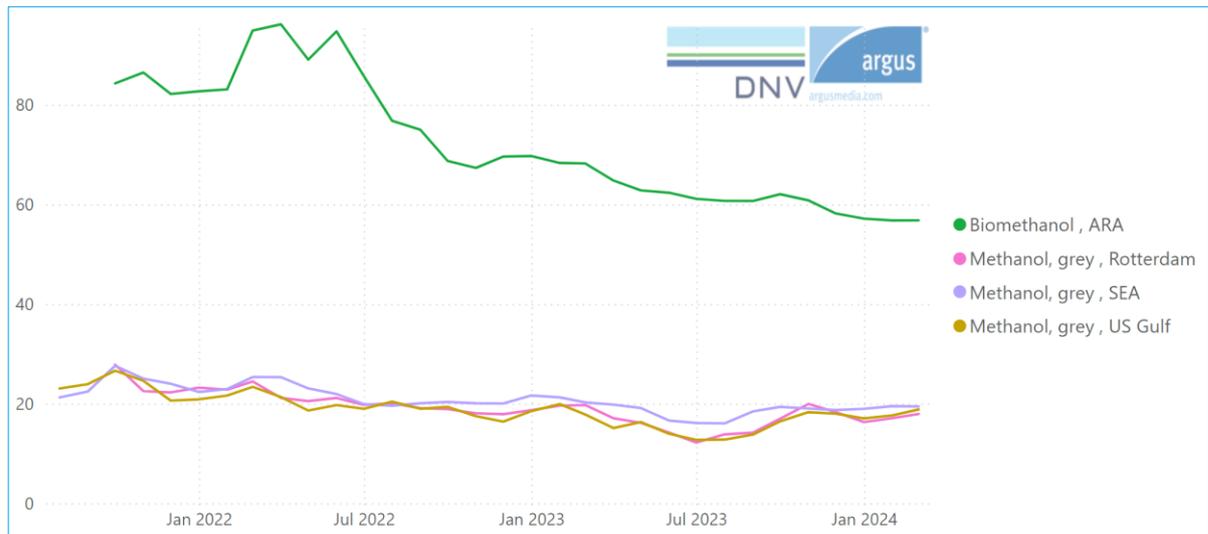


Abbildung 10 | Referenzpreisindex für Methanol in \$/mmBTU von 2022 bis 2024 [25]

Abbildung 11 vergleicht den globalen Methanolpreis in den Regionen Golfküste der USA, Rotterdam und die Küste von China sowie Spot- und Kontraktbasis (Buchung vor Rabatten). Ein Spot-Tarif stellt den Energiepreis zu einem bestimmten Referenzzeitpunkt dar und kommt zumeist bei der Abbildung von Ad-hoc-Nachfrage zum Einsatz. Das Preisniveau ist kaum langfristig verlässlich kalkulierbar und Schwankungen im Tagesgeschäft unterworfen. Kontrakttarife werden meist für einen festen Zeitraum oder spezifische Liefermengen vereinbart. In ihnen wird ein Basispreis definiert, ergänzt um variable Zuschläge oder Preisgleitklauseln. Entsprechende Preise variieren oft weniger dynamisch als Spot-Tarife.

Die Darstellung enthält eine Zeitspanne von März 2021 bis März 2024. In den USA (Kontraktbasis) ist der Methanolpreis von 500 USD/t im März 2021 auf fast 700 USD/t im September 2021 gestiegen und hat im September 2023 fast wieder den Startpreis erreicht. Im März 2024 liegt der Methanolpreis etwas über 600 USD/t. Im März 2021 lag der Preis für Methanol bei rund 350 USD/t in Europa (Kontraktbasis). Dieses Preisniveau wurde bis September 2021 gehalten und ist dann auf knapp über 400 USD/t angestiegen. Im März 2022 lag der Preis knapp über 500 USD/t, dieser sank auf ca. 450 USD/t im Januar 2023. Im Juli 2023 ist der Preis erneut auf unter 400 USD/t gesunken. Im März 2024 wurde das Preisniveau von 450 USD/t erreicht. Das Preisniveau für Methanol in China ist im März 2021 mit demselben Niveau gestartet wie in Europa und lag ab November 2021 unter dem Methanolpreisniveau der USA und von Europa. Im März 2024 lag der Methanolpreis knapp über 300 USD/t.

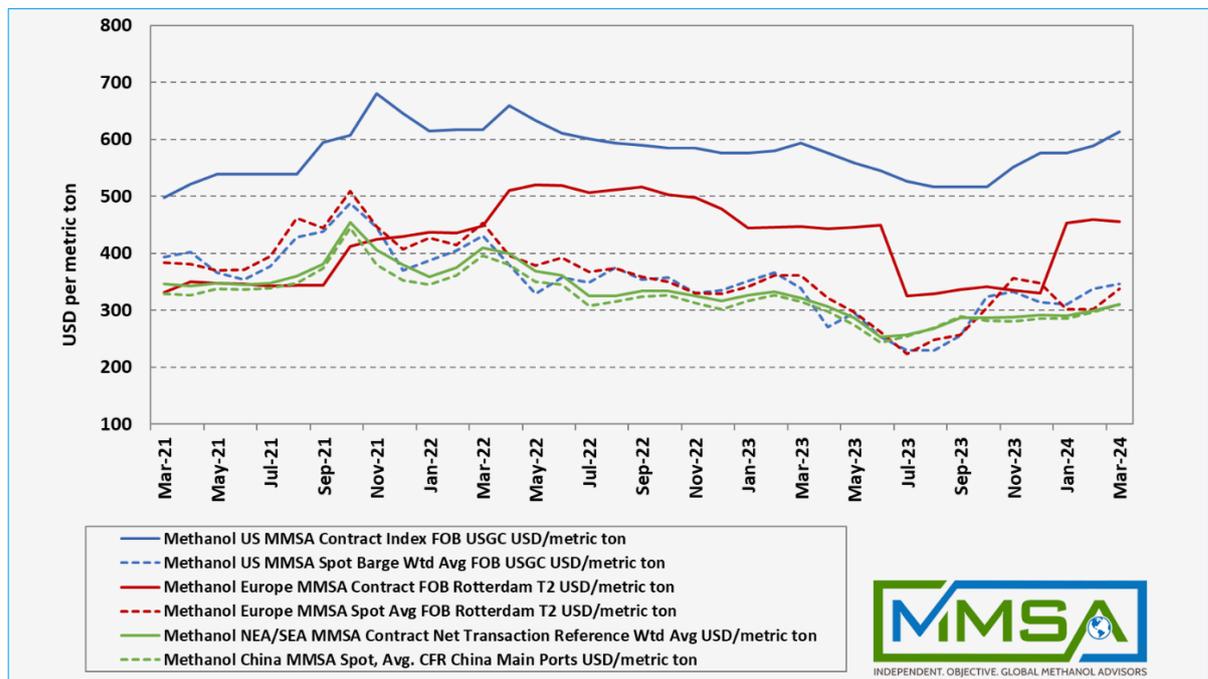


Abbildung 11 | Referenzpreisindex für Methanol von 2021 bis 2024 [28]

3.3.3 Wasserstoff

3.3.3.1 Eigenschaften

Die strombasierte Erzeugung von grünem Wasserstoff erfolgt mittels Elektrolyse. Voraussetzung ist, dass der genutzte Strom aus erneuerbaren Energiequellen (z. B. Sonne, Wind, Wasser) stammt. Ebenso wie für die Erzeugung der Wasserstoff-Derivate Ammoniak und Methanol fehlen für die großskalige Erzeugung von grünem Wasserstoff aktuell die nötigen Kapazitäten. Die Technologie ist bekannt und erprobt, jedoch noch nicht in großem Umfang am Markt verfügbar und noch nicht auf die Produktion großer Mengen ausgelegt.

Im Bereich der Kraftfahrzeuge ist die Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff in Deutschland bereits möglich. Dabei wird die Energieumwandlung in der Regel durch Brennstoffzellen umgesetzt. Der Einsatz von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren ist derzeit im Automobilbereich aufgrund des geringeren Wirkungsgrades der Motoren im Vergleich zu Brennstoffzellen lediglich eine Nischentechnologie. Einige Motorenhersteller forschen jedoch an Wasserstoff-Verbrennungsmotoren – vor allem mit Fokus auf andere Transportsektoren. Der Einsatz von Wasserstoff in der Binnenschifffahrt wird aktuell zudem noch maßgeblich durch fehlende Regulatorik gehemmt.

Durch grünen Wasserstoff in Kombination mit Brennstoffzellen können Schiffsantriebe emissionsfrei gestaltet werden, was einen wertvollen Beitrag zu einer klimaneutralen Schifffahrt

Abbildung 12 | Referenzpreisindex für Wasserstoff im Mai 2024 [27]

Auch für grünen Wasserstoff wird zusätzlich ein Referenzpreisindex als Preisindikator berücksichtigt. Abbildung 13 zeigt einen solchen Index für in den Niederlanden und Kalifornien durch PEM-Elektrolyse hergestellten Wasserstoff inklusive der CapEx.

Der Preis für die Niederlande liegt im betrachteten Zeitraum vom 19. Februar bis 14. April 2024 meist über dem Preis in Kalifornien. Zu Beginn liegt der niederländische Wasserstoffpreis bei ca. 4,75 €/kg und in Kalifornien bei 4,1 USD/kg. Der Preis in Kalifornien sinkt bis Ende Februar auf 3,35 USD/kg und steigt schnell wieder an. Generell ist zu beobachten, dass im gleichen betrachteten Zeitraum der Preis in Kalifornien stärker schwankt. In Niederlanden (5,35 €/kg) sowie in Kalifornien (4,6 USD/kg) ist Anfang März 2024 ein Preishöhepunkt zu verzeichnen. Anfang April ist der Wasserstoffpreis in den Niederlanden dann stark gesunken und erreichte einen Preis von 3,9 €/kg, wohingegen der Preis in Kalifornien auf 4,49 USD/kg angestiegen ist. Mitte April kostete der grüne Wasserstoff in den Niederlanden 4,75 €/kg (starker Preisanstieg) und in Kalifornien 3,46 USD/kg (starke Preissenkung).

Der Preisverlauf zeigt, dass der Preis für grünen Wasserstoff stark schwankt. Generell liegt das Preisniveau in den Niederlanden im Durchschnitt jedoch deutlich über dem Niveau Kaliforniens.

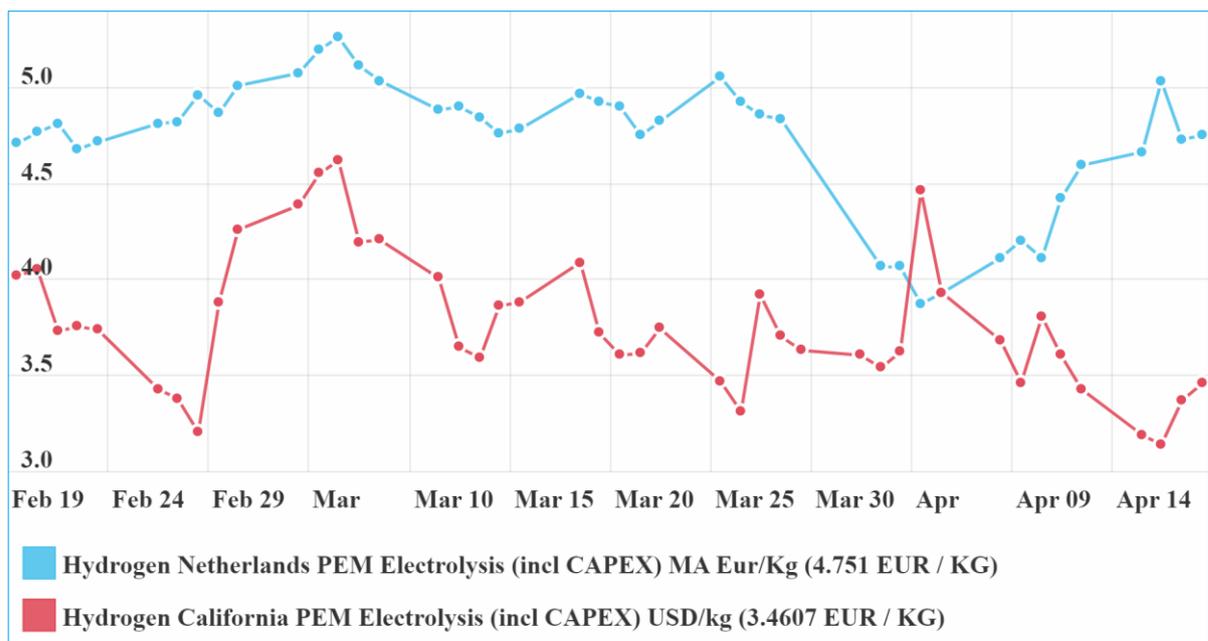


Abbildung 13 | Referenzpreisindex für grünen Wasserstoff im Jahr 2024 [26]

Abbildung 14 zeigt ergänzend einen Referenzpreisindex für grünen Wasserstoff aus Deutschland für den Zeitraum Januar bis April 2024. Diese Übersicht stammt aus dem EEX HYDRIX Index, welcher den Bedarf und die Nachfrage mitberücksichtigt. Im Januar betragen die Kosten ca. 227.500 €/MWh. Ende Januar/Anfang Februar sind die Kosten auf 200.832 €/MWh gesunken. Es folgen Preisschwankungen mit einem Höchstwert von 233.300 €/MWh und einem Tiefstwert von 200.832 €/MWh. Mitte April steigt der Preis auf 249.455 €/MWh und erreicht damit den höchsten Wert, der im betrachteten Zeitraum zu verzeichnen ist.



Abbildung 14 | Referenzpreisindex für grünen Wasserstoff in Deutschland in 2024 [29]

3.3.4 Erdgas (Methan)

3.3.4.1 Eigenschaften

Der Einsatz von Erdgas und synthetisch erzeugtem Erdgas ist heute bereits sowohl in verflüssigter (LNG) als auch komprimierter (CNG) Form technisch und regulatorisch in allen Transportsektoren möglich. Die Energieumwandlung findet in Verbrennungsmotoren statt.

Vor allem der Einsatz von synthetischem, auf Basis erneuerbarer Energien erzeugtem Erdgas (im Folgenden ‚erneuerbares Erdgas‘ genannt) bewirkt eine Reduktion der CO₂- und Schadstoffemissionen im Vergleich zur Verbrennung von herkömmlichem Diesel oder Benzin. Jedoch besteht bei der Verbrennung die Gefahr von klimaschädlichem Methanschlupf. Dieser kann durch die richtige Einstellung der Motoren und den Einsatz geeigneter Abgasnachbehandlungen aktuell gemindert, aber nicht ganz vermieden werden.²

Erdgas-Infrastrukturen sind bereits vorhanden und werden aktuell zudem deutlich ausgebaut. Auch im maritimen Sektor ist das Bunkern von LNG bereits möglich, kommt jedoch im Binnenschiffahrtsbereich nur stark vereinzelt zu Anwendung.

Am Markt verfügbares erneuerbar hergestelltes Erdgas (Methan) stammt aktuell meist aus der Vergärung organischer Ressourcen (Biomethan). Biomethan wird i. d. R. dezentral und in geringen Mengen erzeugt. Seine Rolle als Kraftstoff für die Schifffahrt ist daher als untergeordnet zu bewerten, kann aber durchaus interessant für eine regionale Verwertung sein. Synthetisch auf Basis der Methanisierung von grünem Wasserstoff erzeugtes Methan ist noch als energieintensive Nischentechnologie zu bewerten und wird z. B. in der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung nur am Rande erwähnt.

3.3.4.2 Referenzpreisindizes

In Abbildung 15 wird der Referenzpreisindex für fossiles LNG in Rotterdam im Zeitraum 2021 bis 2024 dargestellt. Im Mai 2021 betrug der Preis für LNG in Rotterdam 562,5 USD/t. Er ist in den darauffolgenden Monaten auf 1.825 USD/t angestiegen. Nach einem kurzen Einbruch des Preises ist er im Dezember 2021 auf 2.549 USD/t gestiegen. Anschließend ist der Preis erneut stark gesunken (1.363 USD/t im Februar 2022), um daraufhin erneut zu steigen. Nach einer erneuten Preissenkung konnte Ende August 2022 der höchste Preis im betrachteten Zeitraum verzeichnet

werden (4.545 USD/t). Seitdem sinkt der Preis mit lediglich kleinen Ausschlägen nach oben. Anfang Mai 2024 betrug der Preis für LNG in Rotterdam 607 USD/t.

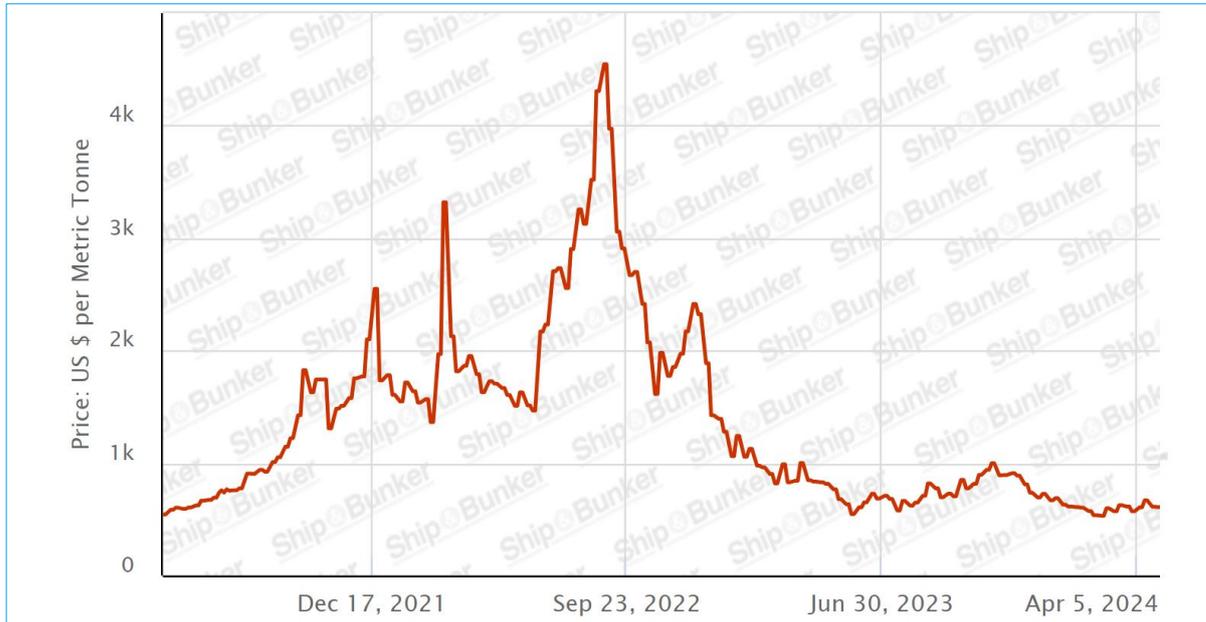


Abbildung 15 | Referenzpreisindex für fossiles LNG in Rotterdam von 2021 bis 2024 [22]

Abbildung 16 visualisiert den Referenzpreisindex für fossiles Erdgas für die Regionen Europa, Asien und in den USA von Januar 2021 bis Dezember 2023. Die Preise für die USA sind im betrachteten Zeitraum durchweg am geringsten. Die Preise in Asien starten mit einer starken Preisschwankung von ca. 20 USD/mmBTU auf über 30 USD/mmBTU, um dann wieder zu sinken und das Niveau in Europa zu erreichen. Die Preise in Europa und Asien schwanken generell stark. Asien erreicht im März 2022 seinen preislichen Höhepunkt mit über ca. 80 USD/mmBTU und Europa erreicht im September 2022 mit 100 USD/mmBTU den höchsten Preis. Anschließend sanken die Preise erneut und befinden sich heute wieder um die 20 USD/mmBTU. Der Rückgang der Preise für Europa und Asien belief sich im Vergleich zu 2022 um 60 % bzw. 50 %.

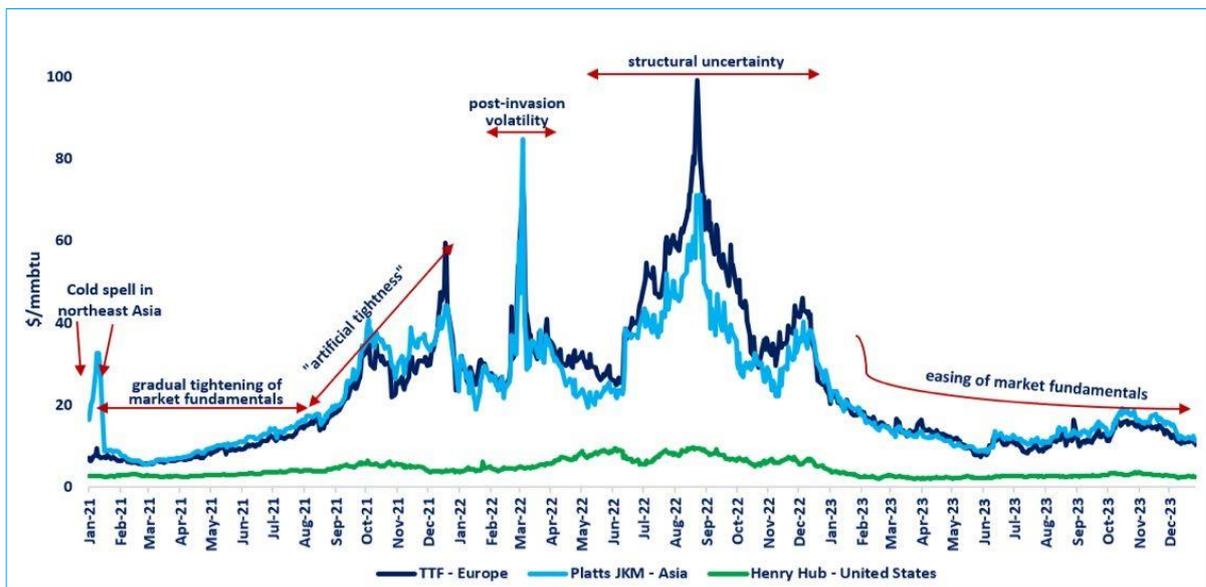


Abbildung 16 | Referenzpreisindex für fossiles Erdgas von 2021 bis 2023 [23]

3.3.5 Ammoniak

3.3.5.1 Eigenschaften

Die Synthese von Ammoniak erfolgt über das Haber-Bosch-Verfahren. Dieses Verfahren ist bereits lange in der Chemie- und Düngemittelindustrie etabliert. Die Herstellung und Lagerung, das Handling und der Transport (auch Übersee) von Ammoniak sind demzufolge erprobt und regulatorisch geregelt. Ein Großteil des weltweit produzierten Ammoniaks wird zur Herstellung von Düngern eingesetzt. Nur ein geringer Anteil (ca. 20 %) stehen für andere Anwendungen zur Verfügung. Als toxische Chemikalie ist Ammoniak in Transport und Lagerung als Gefahrgut eingestuft, was ein erhöhtes Gefahrenpotenzial und damit verbundene umfangreiche Auflagen verursacht.

Ammoniak ist kohlenstofffrei, seine Synthese mit überschaubarem Mehraufwand verbunden und es weist eine deutlich höhere Energiedichte als Wasserstoff auf. Damit wird es zu einem attraktiven Wasserstoffspeicher und Energielieferanten. Aber obwohl, oder gerade weil Ammoniak bereits in großen Mengen produziert wird, müssten die Produktionskapazitäten und nachgelagerten Logistikketten deutlich ausgebaut werden, um zusätzliche Ressourcen für die Nutzung von Ammoniak als Kraftstoff in der Schifffahrt oder Energielieferant für den Industriesektor zu schaffen. Zudem müssten alle bestehenden und zukünftigen Produktionskapazitäten auf eine grüne Ammoniaksynthese umgestellt werden.

Ammoniak kann in der Schifffahrt als Wasserstoffspeicher genutzt werden. Mittels Cracking wird der Wasserstoff aus dem Ammoniak wieder ausgelöst und kann dann in Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren zur Energieumwandlung genutzt werden. Bei diesem Nutzungspfad entstehen, falls grünes Ammoniak eingesetzt wird, keine klimaschädlichen Emissionen. Es besteht

zudem die Möglichkeit, Ammoniak direkt als Kraftstoff zu nutzen. Einige Schiffsmotorenhersteller entwickeln aktuell ammoniakbetriebene Verbrennungsmotoren. Bei der Verbrennung von Ammoniak kann jedoch klimaschädliches Lachgas entstehen, was durch den Einsatz entsprechender Technologien unbedingt vermieden werden sollte.

Eine Umrüstung der bestehenden Schiffsflotte für den Einsatz von Ammoniak als Kraftstoff ist unwahrscheinlich. Ammoniak weist verglichen mit herkömmlichen Kraftstoffen sehr unterschiedliche Materialverträglichkeiten auf. Auch ist aufgrund der geringeren volumetrischen Energiedichte und den erhöhten Sicherheitsanforderungen ein Tanksystem an Bord voraussichtlich anders in das Schiffsdesign zu integrieren. Aufgrund der Toxizität von Ammoniak ist es vornehmlich für den Einsatz in der Frachtschifffahrt und eher nicht für den Einsatz in der Personenschifffahrt geeignet.

Aktuell ist noch kein ammoniakbetriebenes Schiff im Einsatz. Einige Pilotprojekte befinden sich vor allem im Bereich der Seeschifffahrt in der Entwicklung, wie z. B. die ‚Yara Eyde‘.

3.3.5.2 Referenzpreisindizes

Die Abbildung 17 zeigt einen Referenzpreisindex von grünem Ammoniak für die Region Nord-West-Europa. Für Ostasien, Nord-West-Europa und die Golfküste der USA wird zudem die Preisentwicklung von grauem Ammoniak dargestellt. Anfang 2022 war für den graues Ammoniak ein preislicher Höhepunkt zu verzeichnen. Der Preis in den USA belief sich auf ca. 85 USD/mmBTU. Das Preisniveau von grünem Ammoniak in Europa ist relativ stetig mit ca 70 USD/mmBTU. Für grauen Ammoniak lagen die Kosten Anfang 2024 um die 40 USD/mmBTU und für Ostasien bei etwas über 20 USD/mmBTU. Das Preisniveau von grauem Ammoniak ist entsprechend nach dem starken Anstieg im Jahr 2022 wieder deutlich gesunken und liegt mehr als 50 % unter dem Preis für grünes Ammoniak aus Europa.

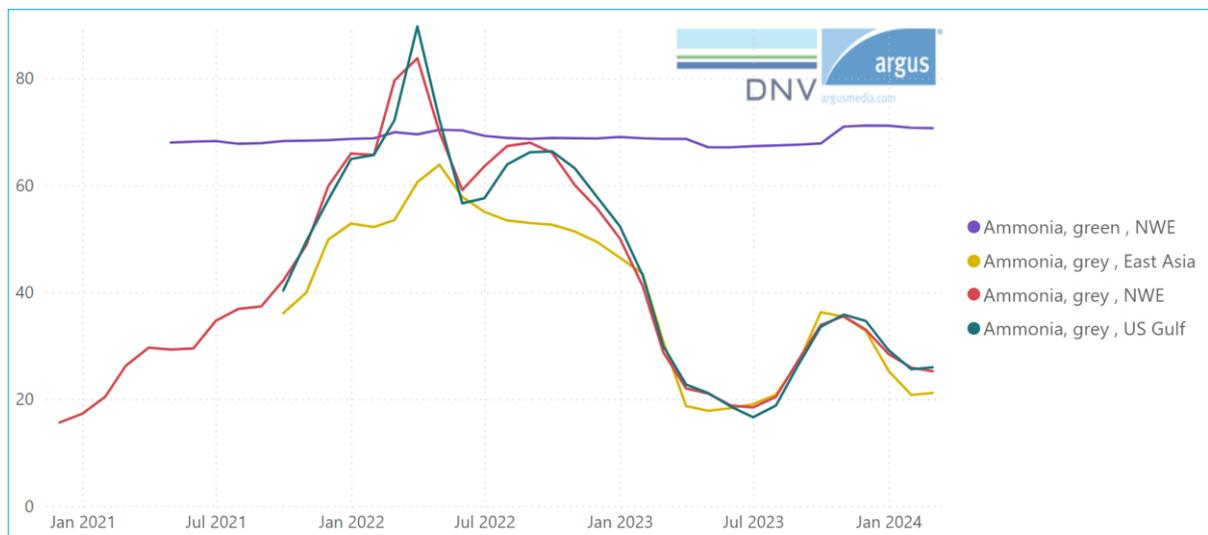


Abbildung 17 | Referenzpreisindex für Ammoniak in \$/mmBTU von 2021 bis 2024 [25]

Zusätzlich zu dem Referenzpreisindex stellt die nachfolgende Abbildung monatliche Durchschnittswerte für Mai 2024 einer täglichen Bewertung von grauem, blauem und grünem Ammoniak für verschiedene Regionen (Mittlerer Osten, Schwarzes Meer, Fernost, Nord-West-Europa und der Golfküste der USA) dar. Die Farben geben dabei die im Syntheseprozess entstehenden CO₂-Emissionen bzw. den Umgang mit dem entstehenden CO₂ an. Lila steht für graues Ammoniak, das durch das herkömmliche Haber-Bosch-Verfahren erzeugt wurde. Blau gekennzeichnete Felder geben Preise für herkömmlich synthetisiertes Ammoniak an, bei dem der Herstellungsprozess durch ein Carbon Capturing ergänzt wurde. Grüne Felder stehen für Ammoniak, das auf Basis alternativer Energie ohne Emission von CO₂ erzeugt wurde. Für den Mittleren Osten wurden Preise für graues Ammoniak erfasst. Der Durchschnittspreis lag bei 245 USD/t, was im Vergleich der günstigste Preis ist. Grünes Ammoniak weist für alle dargestellten Regionen die höchsten Preise auf. Diese schwanken im Mai 2024 zwischen 742 und 794 USD/t. Für graues und blaues Ammoniak lassen sich keine klaren Preiskategorisierungen festlegen. Die Kosten beider schwanken zwischen 245 und 426 USD/mmBTU in Abhängigkeit der Gestehtungsregion.

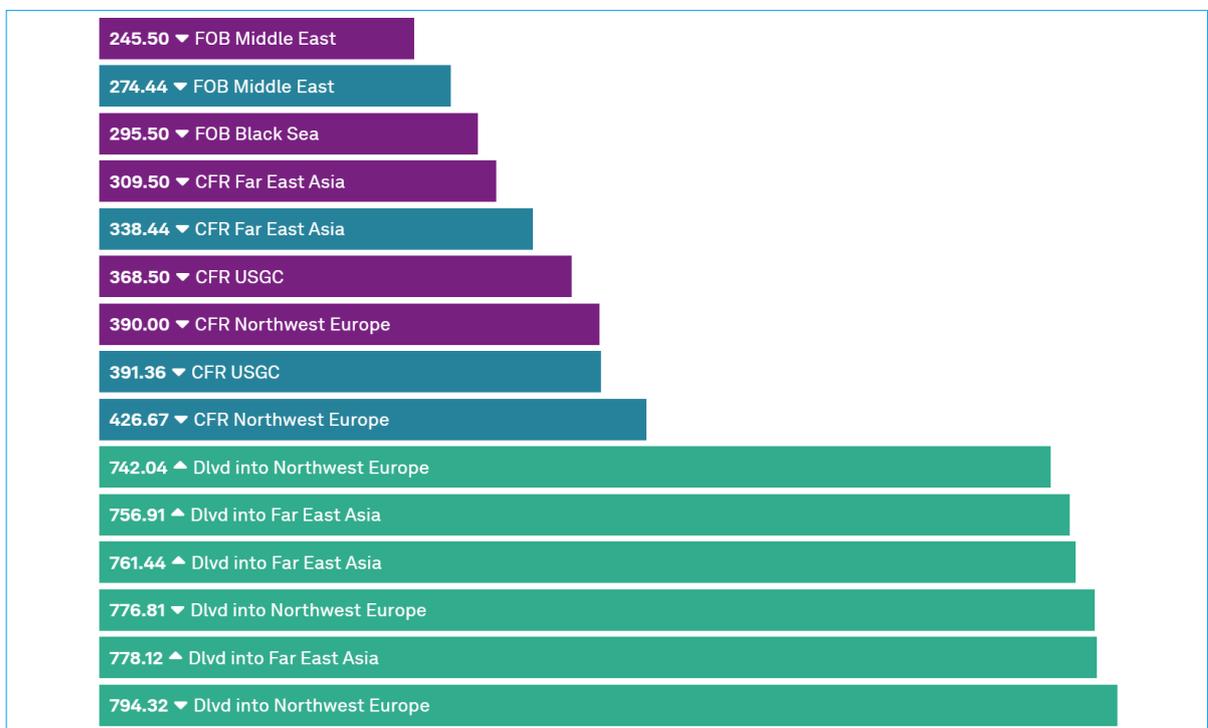


Abbildung 18 | Referenzpreisindex für Ammoniak in \$/mt im Mai 2024 [24]

3.4 Antriebstechnologien

Recherchen zu Technologieentwicklungen zeigen, dass die Einführung neuer Kraftstoffe in der Schifffahrt tendenziell nicht durch mangelhafte technische Entwicklungen im Bereich der Kraftstoff-, Motoren- und Antriebssysteme verzögert wird. Die führenden Schiffsmotorenhersteller entwickeln sowohl 2-Takt- als auch 4-Takt-Verbrennungsmotoren für alternative Kraftstoffe.

Während im 2-Takt-Bereich bereits kommerzielle Lösungen erhältlich sind bzw. der Erscheinungszeitpunkt terminiert ist, ist auch die Nutzung in 4-Takt-Motoren erfolgreich nachgewiesen und erste Anwendungen sind absehbar.

Eine ähnliche Entwicklung zeigt sich auch für die Kraftstoff- und Tanksysteme. Dementsprechend sind die TRL (Technology Readiness Level) der Antriebs- und Tanksysteme für alle Kraftstoffe auf einem fortgeschrittenen Niveau.

Da sowohl die IMO-Regularien ein redundantes Kraftstoffsystem bedingen als auch die neuen Schiffskraftstoffe größtenteils auf Pilot Fuels angewiesen sind, kann davon ausgegangen werden, dass auch zukünftig i. d. R. zwei unterschiedliche Kraftstoffe mitgeführt werden müssen, ein Primärkraftstoff sowie ein Sekundärkraftstoff (Safe Return to Port, Pilot Fuel, ggf. Hilfsmaschine).

Mit steigenden Bestellungen für Dual Fuel-Motoren stellt sich die Frage nach der Weiternutzung der entsprechenden Kraftstoffsysteme. Hierbei können insbesondere Kompatibilitäten zwischen etablierten Kraftstoffen und Methanol (Flüssigkeiten) sowie LNG und Ammoniak und eingeschränkt Wasserstoff festgestellt werden. Diese Alternativen können grundsätzlich als mögliche Umrüstungspfade in Betracht gezogen werden.

Batterieelektrische Antriebe für Fähren sind kein Novum mehr. Sie werden bereits an unterschiedlichen Standorten eingesetzt und es befinden sich weitere Projekte in der Planung. Jedoch ist ein ausschließlicher batterieelektrischer Antrieb aufgrund des durch die Batterien entstehenden Platzbedarfes sowie des großen Zusatzgewichtes für kurze Distanzen nur geeignet, wenn häufige Ladezyklen sichergestellt werden können oder der Energiebedarf generell gering ist. Ebenso ist über die Anleger der Fährschiffe eine entsprechende Ladeinfrastruktur zu gewährleisten. Für die untersuchte Strecke von Brunsbüttel nach Cuxhaven ist ein ausschließlicher batterieelektrischer Antrieb daher nachfolgend nicht berücksichtigt.

3.5 Umweltverträglichkeit

Schädliche Auswirkungen auf die Umwelt durch die Erzeugung und den Einsatz von Kraftstoffen in der Schifffahrt sind nicht nur hinsichtlich ihrer potenziellen sicherheitstechnisch und ökologisch direkt messbaren Auswirkungen ein entscheidendes Kriterium für die Auswahl eines bestimmten Kraftstoffes, sondern können auch starke langfristige Auswirkungen auf die Umwelt haben. So können herkömmliche und alternative Kraftstoffe z. B. gesundheitsschädigende Auswirkungen für Mensch und Tier haben, sie können bei der Produktion und der Umsetzung in einem Antriebssystem klimaschädigende Emissionen verursachen oder ihre Herstellung macht die Nutzung von begrenzt verfügbaren Ressourcen nötig.

Die Umweltverträglichkeit alternativer Kraftstoffe ist Gegenstand einer Vielzahl von Studien. Von besonderem Interesse ist vor allem mögliche Umweltrisiken aufzuzeigen und, wo vorhanden, Potenziale zur Verbesserung der Umweltauswirkungen im Vergleich zu herkömmlichen Kraftstoffen zu generieren. Von der Kollaborationsplattform ‚Nordic Roadmap‘ wurde im April 2023 die Studie ‚Future Fuels for Shipping‘ veröffentlicht [\[19\]](#). Ziel der Studie war es, eine Life-Cycle-

Bewertung alternativer Schiffskraftstoffe unter dem Fokus der THG-Emissionen und der Umweltauswirkungen durchzuführen. In Tabelle 2 sind basierend auf der Studie ausgewählte Kategorien für mögliche Umwelteinflüsse durch Kraftstoffe aufgeführt. Diese wurden anhand ihrer Auswirkungen im Vergleich zur Nutzung von MGO bewertet. Dargestellt ist dabei das Verbesserungs- bzw. Verschlechterungspotenzial als Zahlenwert sowie als farbliche Darstellung. Die Kriterien wurden für verschiedene Kraftstoffoptionen mit verschiedenen Gesteigungspfaden und Antriebssystemen, in denen sie auf Schiffen zum Einsatz kommen, bewertet. Der erste Buchstabe steht in der Bezeichnung für die Gesteigung, der zweite (falls aufgrund mehrerer Optionen eine Spezifizierung nötig ist) für den Aggregatzustand. Die Stoffbezeichnung ist als Summenformel aufgeführt. Als Beispiel: E-L-H2 = strombasiert erzeugter, verflüssigter, Wasserstoff.

Im Rahmen der Studie von Nordic Roadmap wurden die Kraftstoffoptionen E-Ammoniak, E- und Bio-Methanol, E-Methan, E-Wasserstoff sowie die Direktnutzung von Strom bewertet. Die detaillierte Herleitung der quantitativen Bewertung ist der Studie von Nordic Roadmap zu entnehmen. Bio-Methan war nicht Bestandteil der Studie. Eine Bewertung hierfür wurde aufgrund seiner Relevanz auf Basis von im Rahmen von anderen Projekten gewonnenem Wissen durch die Autoren der vorliegenden Studie ergänzt.

Um die untersuchten Kraftstoffe über alle Kriterien hinweg mittels eines Gesamtwertes miteinander und mit MGO vergleichen zu können, wurden die Wertungen der einzelnen Kriterien aufsummiert. Insgesamt sind 16 Kriterien gelistet. MGO als Vergleichskraftstoff wurde in jedem Kriterium mit dem Normwert ,1' versehen, sodass die insgesamt erzielte Summe von MGO einem Wert von 16 entspricht. 16 stellt somit den Vergleichswert für eine Verbesserung (Abweichung nach unten) oder Verschlechterung (Abweichung nach oben) für die alternativen Kraftstoffoptionen dar.

Die Aufsummierte der in der Studie verwendeten Werte zeigt, dass über alle Kriterien hinweg für eine potenzielle Umweltgefährdung nur durch die Nutzung von Bio-Methanol in Kombination mit einer Brennstoffzelle eine Gesamtverbesserung erzielt werden kann.

Jedoch sind nicht alle der Kriterien unmittelbar relevant für den Betrieb einer Fähre. Da es sich um eine generische Life-Cycle-Bewertung handelt, beziehen sich viele Kriterien z. B. auf die Gesteigung, dementsprechend wurden für die vorliegende Studie eigene Anpassungen der Bewertung vorgenommen. Diese sind Tabelle 3 zu entnehmen. Es wurde ein Faktor hinzugefügt, der die Relevanz der Kriterien für den unmittelbaren Fährbetrieb abbilden soll. ,1' bedeutet dabei hohe Relevanz und ,0' keine Relevanz. Das Hinzufügen dieser Wertung zeigt, dass alle Wasserstoffoptionen (E sowohl verflüssigt als auch unter Druck komprimiert), alle Bio-Methanolooptionen sowie die Nutzung von E-Methanol in Kombination mit einer Brennstoffzelle hinsichtlich der Umweltgefährdung die deutlichste Verbesserung gegenüber der Nutzung von MGO bewirken.

Grün = Verminderung des umweltschädlichen Einflusses; Gelb = nahezu gleichbleibender umweltschädlicher Einfluss; Orange = Anstieg des umweltschädlichen Einflusses; Rot = starker Anstieg des umweltschädlichen Einflusses

Kategorien Umwelteinflüsse		Alternative Kraftstoffoptionen & Antriebstechnologie													
		E-NH3		E-MeOH		Bio-MeOH		E-L-CH4		Bio-L-CH4		E-C-H2		E-L-H2	
		4S ICE	SOFC	4S ICE	SOFC	4S ICE	SOFC	4S ICE	SOFC	4S ICE	SOFC	4S ICE	PEM FC	4S ICE	PEM FC
Eutrophierung	maritim	1,1	0,2	1,1	0,2	1	0,1	1,1	0,2	1,1	0,2	1	0,1	1	0,2
Humantoxizität	krebserregend	4,6	3,6	3,1	2,5	2,3	1,8	1,1	0,2	1,1	0,2	2,2	2	2,4	2,2
	krebserregend - Metalle	5,1	4	2,9	2,4	2,7	2,3	5,3	4,3	5,3	4,3	2,2	2	2,4	2,2
	nicht krebserregend	3,6	2,8	2,9	2,4	0,8	0,6	3,2	2,5	3,2	2,5	2,1	1,8	2,2	2
	nicht krebserregend - anorganische Stoffe	-1,7	1,3	1,8	1,5	0,2	0,2	2,3	1,9	2,3	1,9	1,3	1,2	1,4	1,2
	nicht krebserregend - Metalle	4,5	3,5	3,3	2,8	0,9	0,8	3,6	2,9	3,6	2,9	2,4	2,2	2,6	2,4
	nicht krebserregend - organische Stoffe	2,1	1,3	1,3	0,4	1,4	0,5	1,3	0,4	1,3	0,4	0,4	0,3	0,5	0,3

Kategorien Umwelteinflüsse		Alternative Kraftstoffoptionen & Antriebstechnologie													
		E-NH3		E-MeOH		Bio-MeOH		E-L-CH4		Bio-L-CH4		E-C-H2		E-L-H2	
Ionisierende Strahlung		9,7	7,6	10,9	9,1	0,6	0,5	10,9	8,8	10,9	8,8	8	7,2	8,6	7,8
Flächenbedarf		7,1	5,6	7,8	6,5	1,3	1,1	7,8	6,3	1,3	1,1	5,7	5,2	6,1	5,5
Ozonschädlichkeit		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Feinstaub		0,7	0,3	0,7	0,4	0,3	0,1	0,7	0,4	0,7	0,4	0,5	0,2	0,5	0,3
Photochemische Ozonbildung		1	0,1	1,1	0,2	1	0,1	1,1	0,2	1,1	0,2	0,8	0,1	0,8	0,1
Ressourcenverbrauch	fossil	0,9	0,7	1	0,9	0,1	0,1	1	0,8	0,5	0,5	0,8	0,7	0,8	0,7
	Mineralien und Metalle	13,7	10,8	1,4	1,2	5,3	4,4	1,4	1,2	1,5	1,5	0,9	0,8	0,9	0,8
IPCC 2021 GWP 100		0,4	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,5	0,3	0,7	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2
IPCC 2021 GWP 100		0,4	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,8	0,3	0,8	0,5	0,2	0,2	0,2	-0,2
SUMME		54,9	42,2	39,9	31	18,1	12,8	46,9	35,2	35,4	25,9	28,7	24,2	30,6	25,7

Tabelle 2 | Relative Umweltschädlichkeit alternativer Kraftstoffoptionen im Vergleich zum Einsatz von MGO

*4S – 4 stroke engine (Viertaktmotor), 2S – 2 stroke engine (Zweitaktmotor), ICE – internal combustion engine (Verbrennungsmotor), SOFC – solid oxide fuel cell (Festoxid-Brennstoffzelle), PEMFC – proton exchange membrane fuel cell (Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle), Elec.-BE – batterieelektrisch; Alle Viertaktmotoren und Brennstoffzellenoptionen wurden mit dem Einsatz von MGO in Viertaktmotoren verglichen, der Einsatz alternativer Kraftstoffe in Zweitaktmotoren wurde mit dem Einsatz von MGO in Zweitaktmotoren verglichen.

Kategorien Umwelt-einflüsse		Faktor	Alternative Kraftstoffoptionen & Antriebstechnologie													
			E-NH3		E-MeOH		Bio-MeOH		E-L-CH4		Bio-L-CH4		E-C-H2		E-L-H2	
			4S ICE	SOFC	4S ICE	SOFC	4S ICE	SOFC	4S ICE	SOFC	4S ICE	SOFC	4S ICE	PEM FC	4S ICE	PEM FC
Eutrophierung	maritim	0,75	0,83	0,15	0,83	0,15	0,75	0,08	0,83	0,15	0,83	0,15	0,75	0,08	0,75	0,15
Humantoxizität	krebserregend	1	4,60	3,60	3,10	2,50	2,30	1,80	5,90	4,70	4,70	4,70	2,20	2,00	2,40	2,20
	krebserregend - Metalle	1	5,10	4,00	2,90	2,40	2,70	2,30	5,30	4,30	4,30	4,30	2,20	2,00	2,40	2,20
	nicht krebserregend	1	3,60	2,80	2,90	2,40	-0,8	-0,6	3,20	2,50	2,50	2,50	2,10	1,80	2,20	2,00
	nicht krebserregend - anorganische Stoffe	1	-1,7	1,30	1,80	1,50	-0,2	-0,2	2,30	1,90	1,90	1,90	1,30	1,20	1,40	1,20
	nicht krebserregend - Metalle	1	4,50	3,50	3,30	2,80	-0,9	0,80	3,60	2,90	2,90	2,90	2,40	2,20	2,60	2,40
	nicht krebserregend - organische Stoffe	1	2,10	1,30	1,30	-0,4	1,40	-0,5	1,30	-0,4	-0,5	-0,6	-0,4	-0,3	-0,5	-0,3
Ionisierende Strahlung		0,25	2,43	1,90	2,73	2,28	0,15	0,13	2,73	2,20	2,73	2,20	2,00	1,80	2,15	1,95
Flächenbedarf		0,25	1,78	1,40	1,95	1,63	0,33	0,28	1,95	1,58	0,33	0,28	1,43	1,30	1,53	1,38
Ozonschädlichkeit		0,5	0,00	-0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Kategorien Umwelt-einflüsse		Faktor	Alternative Kraftstoffoptionen & Antriebstechnologie													
			E-NH3		E-MeOH		Bio-MeOH		E-L-CH4		Bio-L-CH4		E-C-H2		E-L-H2	
Feinstaub		0,5	0,35	0,15	0,35	0,20	0,15	0,05	0,35	0,20	0,35	0,20	0,25	0,10	0,25	0,15
Photochemische Ozonbildung		0,75	0,75	0,08	0,83	0,15	0,75	0,08	0,83	0,15	0,83	0,15	0,60	0,08	0,60	0,08
Ressourcenverbrauch	fossil	0,25	0,23	0,18	0,25	0,23	0,03	0,03	0,25	0,20	0,13	0,13	0,20	0,18	0,20	0,18
	Mineralien und Metalle	0,25	3,43	2,70	0,35	0,30	1,33	1,10	0,35	0,30	0,38	0,38	0,23	0,20	0,23	0,20
IPCC 2021 GWP 100		0,5	0,20	0,16	0,08	0,12	0,08	0,04	0,04	0,20	0,12	0,28	0,00	0,08	0,08	0,08
IPCC 2021 GWP 100		0,5	0,20	0,10	0,15	0,15	0,05	0,05	0,40	0,15	0,40	0,25	0,10	0,10	0,10	-0,10
SUMME			30,08	23,31	22,81	16,80	10,01	6,72	29,32	21,43	22,37	20,31	15,75	13,11	16,88	14,06

Tabelle 3 | Gewichtete Umweltverträglichkeit alternativer Kraftstoffe im Fährbetrieb (Im Vergleich zum Einsatz von MGO)

3.6 Regionale Verfügbarkeit

Für alternative Kraftstoffe existieren, anders als für herkömmliche Kraftstoffe, aktuell nur sehr sporadisch Bunkerstrukturen oder/und Strukturen, die zur Versorgung von Bunkerstrukturen dienen können. Dieses Fehlen von Versorgungs- und Infrastrukturen macht eine kleinteilige und dezentrale Versorgung mit alternativen Kraftstoffen sehr aufwendig. Daher ist es zu empfehlen, den Kraftstoff direkt aus ohnehin in der Region geplanten Erzeugungs- oder Importprojekten für alternative Kraftstoffe zu beziehen. So werden hohe Logistikkosten für den Transport vermieden sowie die Störanfälligkeit der Versorgungskette reduziert.

Tabelle 4 listet in der weiteren Umgebung geplante Erzeugungs- und Importprojekte für unterschiedliche alternative Kraftstoffe, die als Versorgungsquelle in Frage kommen könnten.

	Standort	Energieträger	Betreiber	Kapazität/ Ausbau	Inbetriebnahme
Synthese	Brunsbüttel	Methanol	Vivevo energy GmbH	Produktion von E-Methanol und weiteren E-Fuels im ChemCoastPark, geplante Wasserstoffproduktion. ca. 27 t/d	
		E-Fuels			
	Stade	Methanol	DOW Stade	Planung von großskaliger Produktion von e-Methanol (200.000 t/a), vereinzelte Pressemeldungen verkünden jedoch den Abbruch des Projekts	
	Hamburg	Wasserstoff	Hamburg Green Hydrogen Hub Konsortium (HHGH)	100 MW Elektrolyse, weitere Ausbaustufen mit bis zu + 700 MW möglich	2026
			TES, EWE	500-MW-Elektrolyseur	
			Uniper	1-GW-Elektrolyseur, 300.000 t/a gemeinsam mit Importterminal (Ammoniak)	
Wilhelms-haven	Wasserstoff	Volth ₂ Operating B.V.	Entwicklung von 6 Anlagen zur Produktion von grünem Wasserstoff in NL & DE; in WHV bis zu 100 MW	2028	
Friesoythe		Methanol	Hy2Gen	60.000 t/a	2027
Import	Hamburg	Methanol	Hamburger Blue Hub (Lothar Gruppe, Evos Hamburg GmbH)	Importhafen für synthetische Brenn- und Treibstoffe	2026
		E-Fuels			
		Ammoniak			Mabanaft, Air Products
	Stade	LNG	Hanseatic Energy Hub	Aktuell FSRU, ab 2027 fest installiertes Importterminal	Q4 2023/
					2027
Brunsbüttel	LNG	Deutsche Energy Terminal	Aktuell FSRU, Ausbau zu fest installiertem Importterminal geplant (bis 2026)	Q1 2023/	

Standort	Energieträger	Betreiber	Kapazität/ Ausbau	Inbetriebnahme
Wilhelms- haven	Ammoniak	Yara	Umrüstung des vorhandenen Export- zu einem Importterminal, geplant 3 Mio. t/a Rostock + Brunsbüttel	2026
			Ausbaustufe 1: 300.000 t/a	
	Wasserstoff	RWE	Ausbaustufe 2: 2 Mio. t/a	2026
		RWE	Ammoniakimportterminal mit nachgelagertem Cracker	
	LNG	Uniper	Zunächst FSRU, langfristig fest installiertes Importterminal geplant	Q4 2022
	Ammoniak	Uniper	Ammoniakimportterminal mit nachgelagertem Cracker, 300.000 t/a Wasserstoff gemeinsam mit Elektrolyseur	
		bp	Ammoniakimportterminal mit nachgelagertem Cracker, 130.000 t/a Wasserstoff	2028
E-Methan	TES, FFI	Importterminal, 5 Mio. t/a (Import von E-Methan und anschließende Rückgewinnung von Wasserstoff)	2026	

Tabelle 4 | Geplante Importhubs und Erzeugungsstrukturen für alternative Energieträger in HH, NDS und SH

Die gelisteten Projekte zeigen, dass Kapazitäten für LNG, E-Methanol, Ammoniak, Wasserstoff und für weitere E-Fuels, die bisher nicht genauer spezifiziert wurden, geplant sind. Durch die geplanten Projekte zur Erzeugung alternativer Kraftstoffe und die Importterminals ist in der Region mit ausreichend Verfügbarkeit für alle potenziell relevanten alternativen Kraftstoffe zu rechnen.

Für die Kraftstoffoption Wasserstoff ist darauf hinzuweisen, dass die Reinheit von aus Crackingprozessen stammendem Wasserstoff stark variieren kann. Es ist wahrscheinlich, dass sie den Anforderungen eines Fährantriebsystems nicht entspricht. Wasserstoff sollte daher unmittelbar aus regionalen Erzeugungen bezogen werden.

3.7 Zwischenfazit

Die vorangehend dargestellten stofflichen Eigenschaften, der Stand von technologischen Entwicklungen, der Status der Regulatorik und die Verfügbarkeit, lassen Schlussfolgerungen zu, welche alternative Kraftstoffoption in welchem Bereich ein bereits hohes oder noch geringes Marktreifeniveau aufweisen. Die nachstehende Abbildung visualisiert die Marktreife entlang unterschiedlicher als relevant erachteter Kriterien über eine Skala von 1 (gering) bis 9 (hoch) in Anlehnung an die etablierte Skala der TRL.

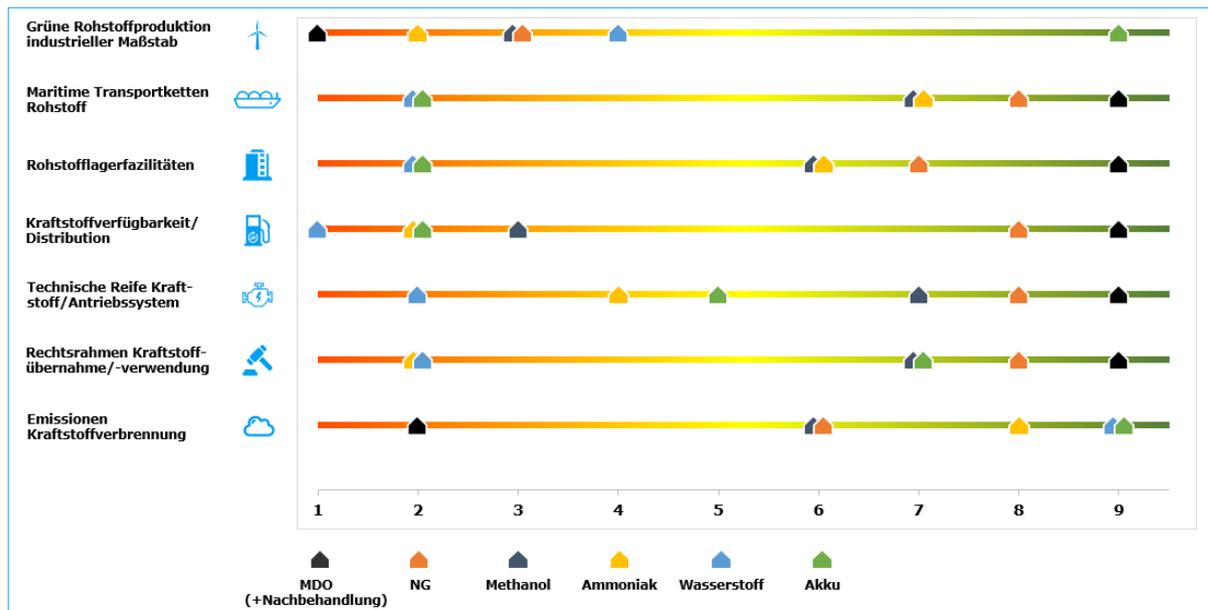


Abbildung 19 | Bewertung Marktreife der Kraftstoffoptionen und -technologien

Die Darstellung veranschaulicht, dass aktuell insbesondere für die Nutzung reinen Wasserstoffs in der Schifffahrt die Regulatorik, aber auch die Lagerung, Distribution sowie der Einsatz auf Schiffen noch auf keinem ausreichenden Marktreifeniveau sind, um zeitnah mit einer dynamischen Marktdurchdringung rechnen zu können. Für die Planung von Anwendungen bedeutet dies, dass von großem zusätzlichem Zeit- und Kostenaufwand ausgegangen werden muss, um vor allem regulatorische und technische Hürden zu überwinden und eine dauerhafte Bereitstellung von Wasserstoff in ausreichender Menge zu gewährleisten. Es kann jedoch ergänzt werden, dass durch den erhöhten Innovationsdruck und die klimapolitischen Vorgaben in den nächsten Jahren vermehrt Technologien in eine breitere Marktverfügbarkeit gelangen und der regulatorische Rahmen entsprechende Anpassung erfahren wird. Wasserstoff kann demzufolge für eine Fähre, die erst in einigen Jahren in Betrieb genommen wird, von Relevanz sein.

Ammoniak als etablierte Grundchemikalie der Düngemittelindustrie kann zwar zum Teil von bestehenden Lager- und Verteilinfrastrukturen profitieren, aber die regulatorische Etablierung, der Umgang mit Störfällen sowie die noch nicht am Markt etablierten Antriebstechnologien stellen sehr große Herausforderungen dar.

Mit Blick auf den Einsatz eines in Zukunft durch klimaneutrale Kraftstoffe betriebenen Antriebs eignen sich entsprechend der dargestellten Bewertung der Marktreife insbesondere Methanol oder E-Fuels, die in Zukunft in herkömmlichen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden und so sukzessive Marinediesel ersetzen können. Auch der Einsatz von Erdgas bzw. Methan (in der Abbildung als NG – *Natural Gas* dargestellt) ist auf Basis der Marktreifegrade als realistische Option zu werten, sollte aber einer Prüfung unterzogen werden, inwiefern mittel- bis langfristig Alternativen synthetischen (E-) oder biogenen Ursprungs zur Verfügung stehen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass unter Einbezug der stofflichen Eigenschaften, der Marktreife, der Umweltverträglichkeit sowie der regionalen Verfügbarkeit insbesondere die Kraftstoffoptionen

- Bio- und E-Methanol sowie
- E-Wasserstoff und ergänzend
- MDO-Äquivalente (E- & Bio-Diesel) sowie
- E- & Bio-NG

von besonderer Relevanz sind. Wasserstoff kann dabei sowohl verflüssigt als auch komprimiert zum Einsatz kommen. Der Einsatz von Bio-Methanol und Wasserstoff ist unter umweltverträglichen Aspekten sowohl in einer Brennstoffzelle als auch in einem 4-Taktmotor, E-Methanol in Kombination mit einer Brennstoffzelle zu empfehlen.

Unabhängig vom Kraftstofftyp können und sollten über langfristige Kontrakttarife in der Beschaffung temporäre Preisschwankungen abgefedert werden. Eine verlässliche Absicherung gegenüber schockartigen Preissteigerungen am Rohstoff- bzw. Kraftstoffmarkt ist für einen Fährbetrieb als z. B. Einschiffsgesellschaft oder nur mit einer/wenigen Verbindung(en) kaum möglich. Hierfür wäre externe Unterstützung notwendig sowie die Berücksichtigung eines Dual-Fuel-Antriebes, der grundsätzlich den gleichrangigen Einsatz zweier Kraftstoffe als redundante Systeme ermöglicht.

4. Indikative Kostenschätzungen

4.1 CapEx

Die CapEx (Capital Expenditures) für ein Fährschiff mit den wesentlichen unter Kapitel 2.6 spezifizierten Parametern und einem diesel-elektrischen Antrieb wurden anhand von dokumentierten Schiffsbestellungen der jüngeren Vergangenheit nachvollzogen. Hierfür wurde die Schiffsdatenbank von Clarkson Research Services genutzt. Ergänzend erfolgte eine überschlägige Anpassung anhand antizipierter Marktpreissteigerungen und eine Qualifizierung in Expertengesprächen.

Die CapEx-Schätzung für Fährschiffe mit alternativen Antrieben erfolgte auf Grundlage eigener Marktexpertise und von Querschnittsbetrachtungen zu anderen Schiffssegmenten. Hinreichend belastbare Marktdaten sind wegen der noch sehr geringen Anzahl vergleichbarer Fährschiffprojekte kaum bis nicht gegeben.

Generell beziehen sich alle dargestellten CapEx auf Schiffsneubauten, um eine Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Antriebsformen und Kraftstoffoptionen zu gewährleisten. Es ist davon auszugehen, dass die Anschaffung eines Bestandsschiffes mit deutlich geringeren CapEx verbunden ist. Aufgrund der im Vergleich geringeren Marktverbreitung von alternativen Antrieben unter den geeigneten Bestandsschiffen muss auf eine entsprechende Gegenüberstellung hier verzichtet werden.

Den CapEx liegt einer Konzeptbetrachtung im Sinne einer Klasse-5-Schätzung zugrunde. Der hiermit einhergehende Genauigkeitsbereich geht mit einer erwartbaren typischen Kostenabweichung nach unten in Höhe von bis zu 50 % und nach oben mit bis zu 100 % einher. Um unvorhersehbare und nicht berücksichtigte Kostenpositionen zu berücksichtigen, wurde zudem eine *Contingency* von 25 % berücksichtigt.

Die Berechnung wurde auf die Investitionskosten inklusive *Contingency* durchgeführt. Die Kapitalkosten basieren auf der Annahme einer vollständigen Fremdfinanzierung. Folgende weitere Annahmen wurden zur Berechnung der Rückzahlungsraten, Zinsen und Gebühren sowie Gesamtaufwand getroffen:

- Zinssatz: 6 %
- Ratenintervall: jährlich
- Zahlungsart: nachschüssig
- Laufzeit: 15 Jahre

	Dimension				
Kraftstoff	Typ	Diesel	Methanol	LNG	Wasserstoff
CapEx (Netto)	Mio. €	30	33	36	39
CapEx (mit 25% contingency)	Mio. €	37,5	41,3	45,0	48,8
Zinssatz	%	6	6	6	6
Ratenintervall		Jährlich	Jährlich	Jährlich	Jährlich
Laufzeit	Jahre	15	15	15	15
Gesamtbelastung	Mio. €/a	3,8	4,2	4,6	5,0
Gesamtbelastung (15 Jahre)	Mio €/15 Jahre	57,9	63,7	69,5	75,3

Tabelle 5 | CapEx Kostenschätzung

Durch die Berechnung der CapEx ergibt sich eine jährliche Gesamtbelastung von 3,8 bis 5,0 Mio. € abhängig vom genutzten Kraftstoff.

4.2 OpEx

Die wiederkehrenden Kosten (Operating Expenses – OpEx), die durch den Betrieb der Fähre entstehen, werden vor allem durch die Kosten für den Kraftstoff, das Personal und weitere Kosten, wie z.B. für Reparatur und Wartung bestimmt. Die nachstehenden Kalkulationen orientieren sich im Wesentlichen an diesen Kostenpositionen und sollen indikative OpEx aufzeigen, um eine Abwägung hinsichtlich der Betriebskosten für unterschiedliche Kraftstoffoptionen zu ermöglichen.

Die Berechnung der Kraftstoffkosten basiert auf dem ‚Cost Calculator‘ vom Mærsk Mc-Kinney Møller Center. Für die jeweiligen Kraftstoffe wurden die Grundeinstellungen wie folgt gewählt:

- Emissionskosten wurden mit 100 USD/t und ‚Well-to-Wake Emission Scope‘ gewählt.
- Die betrachtete Region wurde auf Europa eingestellt.
- Die Elektrizitätskosten wurden auf ‚low‘ eingestellt.
- Die Einheit für die Kosten der Kraftstoffe wurde in USD/t angegeben, die anschließend mit dem Faktor 0,93 in €/t umgerechnet wurden.

Die Grundannahmen für die Motorisierung der Fähre wurden für alle Kraftstoffoptionen gleich gewählt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Die im Rahmen der Kostenschätzung berücksichtigten Kraftstoffoptionen sind die auf Basis der Verfügbarkeit, Umweltverträglichkeit und technologischen Reife in den vorangegangenen Kapiteln als potenziell geeignet bewerteten Optionen: Bio- und E-Methanol sowie E-Wasserstoff und ergänzend MDO-Äquivalente (E- & Bio-Diesel) sowie E- und Bio-NG.

Kraftstoff	Dimension	Brunsbüttel-Cuxhaven (1 Schiff)						
		E-Diesel	Bio-Diesel	E-Methanol	Bio-Methanol	E-LNG	Bio-LNG	E-Wasserstoff
CapEx (25% contingency)	Mio. €	37,5	37,5	41,3	41,3	45,0	45,0	48,8
Antriebsleistung	kW	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
Mittlere Auslastung	%	75	75	75	75	75	75	75
Wirkungsgrad	%	45	45	45	45	45	45	45
Heizleistung	[kWh/t]	11.810	11.810	5.530	5.530	13.890	13.890	33.330
Fahrzeit je Rundreise	h	2	2	2	2	2	2	2
Fahrzeit je Tag	h	10	10	10	10	10	10	10
Verbrauch je Rundreise	kWh	23.333	23.333	23.333	23.333	23.333	23.333	23.333
Verbrauch je Tag	kWh	116.667	116.667	116.667	116.667	116.667	116.667	116.667
Verbrauch je Jahr (365 Betriebstage)	kWh	42.583.333	42.583.333	42.583.333	42.000.000	42.000.000	42.000.000	42.000.000
Verbrauch je Jahr	t	3.606	3.606	7.700	7.595	3.024	3.024	1.260
Kosten je Tonne	€/t	2.500	1.100	1.000	600	2.200	1.100	2.900
Kraftstoffkosten je Jahr	Mio. €/a	9,0	4,0	7,7	4,6	6,7	3,3	3,7

Table 6 | OpEx Kostenschätzung Kraftstoff

Die angesetzten Personalkosten beruhen auf vorangehenden Studien und im Rahmen von Gesprächen gewonnenen Markteinsichten. Personalkosten können je nach Standort und Unternehmen stark schwanken. Eine merkliche Abweichung von den nachstehend gelisteten Werten ist daher wahrscheinlich.

Besetzung	Jahresgehalt pro Person	Anzahl pro Schiff	Kosten
Kapitän	72.000	2,5	180.000
1. nautischer Offizier mit Kapitänspatent	66.000	2,5	165.000
1. Ingenieur	66.000	2,5	165.000
Bootsmann/Matrose	48.000	2,5	120.000
Leichtmatrose	42.000	2,5	105.000
Summe Schiffspersonal			735.000
Soziale Abgaben	25%		183.750
Personalkosten Schiffbetrieb			918.750
Geschäftsführer	80.000	1,0	80.000
Buchhalter	45.000	1,0	45.000
Sekretärin	30.000	1,0	30.000
Terminalpersonal	40.000	2,5	100.000
sonst. Personal (Springer)	30.000	1,0	30.000
Summe Landpersonal			285.000
soziale Abgaben	25%		71.250
Personalkosten Landbetrieb			856.250
Personalkosten Fährbetrieb [Mio. €/a]			1,28

Tabelle 7 | OpEx Kostenschätzung Personal

Die öffentlich verfügbare Datenlage für operative Kosten von kleinen und mittleren RoRo/RoPAX-Fährschiffen ist sehr beschränkt. Daher wurde der Drewry Bericht ‚Ship Operating Costs – Annual review and Forecast 2023/24‘ als Basis zur Berechnung von weiteren operativen Kostenpunkten wie Versicherung, Maintenance & Repair sowie sonstigen Fixkosten genutzt. Die Kosten in dem Bericht sind in USD/d (US-Dollar pro Tag) angegeben und wurden mit dem Faktor 0,93 in €/d (Euro pro Tag) umgerechnet. Außerdem können dem Bericht Kosten und Größen von Schiffsneubauten über einen Zeitraum von 20 Jahren in 5-Jahres-Schritten entnommen werden. Als Grundlage zur Berechnung der OpEx wurden die dort angegebenen Neubaupreise verwendet. Für die im Rahmen dieser Studie verwendete Schiffsgröße von 500 dwt konnten dem Bericht keine konkreten Zahlen entnommen werden. Aus diesem Grund wurden die Kosten für 500 dwt mithilfe einer Trendfunktion approximiert.

Kostenpunkt	Dimension	Kosten bei einem Neubau
Versicherung	€/a	146.000
Repairs & Maintenance	€/a	51.100
Zwischensumme	€/a	197.100
Sonstiges (z.B. Stores, Spares)	€/a	185.274
Summe	€/a	382.374

Tabelle 8 | OpEx Kostenschätzung weitere Fixkosten

Die vorangehend dargestellten Kostenschätzungen der CapEx und OpEx für den Betrieb einer Fähre zwischen Brunsbüttel und Cuxhaven ergeben in Summe eine Indikation, in welcher Größenordnung die jährlichen Aufwendungen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Kraftstoffoptionen liegen könnten. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die jährlich anfallenden Gesamtkosten (OpEx und abzuzahlende CapEX).

Brunsbüttel-Cuxhaven (1 Schiff)								
Kostenpunkt	Dimension	E-Diesel	Bio-Diesel	E-Methanol	Bio-Methanol	E-LNG	Bio-LNG	E-Wasserstoff
CapEx-Gesamtbelastung	Mio. €/a	3,8	3,8	4,2	4,2	4,6	4,6	5,0
Kraftstoffkosten	Mio. €/a	9,0	4,0	7,7	4,6	3,3	3,3	4,3
Personalkosten	Mio. €/a	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Sonstige OpEx	Mio. €/a	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Summe	Mio. €/a	14,5	9,4	13,6	10,4	12,9	9,6	10,3

Tabelle 9 | Überblick der jährlichen Kosten

Die jährlichen Gesamtkosten (CapEx und OpEx) schwanken je nach genutztem Kraftstoff zwischen 9,4 und 14,5 Mio. €. Der Einsatz von E-Kraftstoffen führt dabei insgesamt zu höheren jährlichen Gesamtkosten als die Nutzung von Bio-Kraftstoffen. Bio-Diesel führt auf Basis der vorliegenden Kostenschätzung zu den geringsten jährlichen Kosten.

4.3 Zwischenfazit

1. Als größter jährlicher Kostenpunkt lassen sich die Kraftstoffkosten nennen, gefolgt von den jährlichen Ratenzahlungen über 15 Jahre zur Tilgung des Anschaffungskredits für das Ro/PAX-Schiff.
2. Als günstigste Alternative für konventionellen Schiffskraftstoff lässt sich Bio-Kraftstoff erkennen. Im Vergleich der Bio-Kraftstoffe stellt Bio-Diesel die günstigste Variante dar, gefolgt von Bio-LNG und Bio-Methanol.
3. Hinsichtlich der strombasierten Gestehung für Schiffskraftstoffe zeigt sich wiederum E-Wasserstoff als günstigste Variante. Anschließend folgen die Kraftstoffe E-LNG, E-Methanol und als teuerste Alternative E-Diesel. Im Falle höherer Stromkosten für die Kraftstoffgestehung verändert sich das absolute Kostenniveau. Eine Veränderung der Reihenfolge der Optionen ist nicht gegeben.
4. Im Falle der Nutzung eines Bestandsschiffes mit herkömmlichem Antrieb, bietet sich die Möglichkeit eines (partiellen) Einsatzes von Bio-Diesel zur rechtlich konformen und schrittweisen Reduzierung von THG-Emissionen gegenüber dem Einsatz von fossilem Diesel an. Aufgrund des Mehrpreises von E-Diesel gegenüber anderen strombasierten Kraftstoffen ist eine entsprechend weiterführende Substitution betriebswirtschaftlich weniger vorteilhaft. Die Möglichkeit eines Retrofits von Schiffen mit alternativen Antrieben bzw. Kraftstoffen sowie die potenziellen Fördermöglichkeiten einer solchen Maßnahme ist individuell zu betrachten und an dieser Stelle daher ausgeklammert.
5. Für einen möglichen Schiffsneubau sollte aufgrund der ermittelten Kostenverteilung bei strombasierten Kraftstoffen komprimierter Wasserstoff oder LNG neben Diesel als Dual-Fuel-Antrieb priorisiert werden. Im Allgemeinen ist ein gleichrangiger Einsatz der Kraftstoffe als redundante Systeme zu berücksichtigen.

5. Zusammenfassende Bewertung

Die Städte Brunsbüttel und Cuxhaven liegen Luftlinie nur ca. 20 km entfernt, werden jedoch durch die Elbe voneinander getrennt. Um die beiden Städte und so auch die Regionen westliches bzw. südwestliches Schleswig-Holstein und nördliches Niedersachsen miteinander zu verbinden, gab es in der Vergangenheit häufiger Versuche, eine Fährverbindung zwischen Brunsbüttel und Cuxhaven zu etablieren. Keine der Verbindungen, die auch tatsächlich umgesetzt wurden, konnte jedoch dauerhaft betrieben werden.

Um von Brunsbüttel nach Cuxhaven (oder andersherum) zu gelangen, muss aktuell entweder ein langer Umweg über Hamburg in Kauf genommen werden oder die existierende Fährverbindung von Glückstadt nach Wischhafen, unter Inkaufnahme eines Umwegs von ca. 95 km, genutzt werden. Die Fähre weist jedoch beschränkte Transportkapazitäten auf und ist nicht gleichermaßen gut an das überregionale Straßennetz angebunden wie Brunsbüttel und Cuxhaven.

Um die beiden Regionen dieser Bundesländer wieder miteinander auf direktem Wege zu verbinden und auch die Wirtschaftsräume über einen direkten Verkehrsweg zu verknüpfen, steht immer wieder die Überlegung im Raum, erneut eine Fährverbindung zwischen Brunsbüttel und Cuxhaven zu etablieren. Eine solche Verbindung kann voraussichtlich nur auf Dauer Bestand haben, wenn ein wirtschaftlicher Betrieb der Fähre sichergestellt werden kann. Wesentliche Voraussetzung hierfür ist, die voraussichtlichen jährlich wiederkehrenden Kosten für den Fährbetrieb zu kennen bzw. einzuschätzen.

Da die Fähre als Teil des Schifffahrtsverkehrs den regulatorisch festgelegten zukünftigen Anforderungen an die Senkung der Emissionen des Verkehrssektors unterliegt, sollte unbedingt von Planungsbeginn an in einem potenziellen Konzept berücksichtigt werden, dass die Fähre langfristig klimaneutral betrieben werden sollte. Der Einsatz verschiedener alternativer Antriebe und Kraftstoffe wird jedoch die Anschaffungs- und Betriebskosten für die Fähre erhöhen.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden daher unterschiedliche Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Plausibilität für den Einsatz in einer Fähre zwischen Brunsbüttel und Cuxhaven geprüft. Unter Anbetracht ihrer regionalen Verfügbarkeit, um Kosten für die Bereitstellungslogistik zu vermeiden, und der Umweltverträglichkeit der verschiedenen Kraftstoffe sowie der technologischen Reife und Marktverfügbarkeit der jeweils benötigten Infrastrukturen und Antriebssysteme, konnte die Vorauswahl der möglichen Kraftstoffe auf Bio- und E-Methanol sowie E-Wasserstoff und ergänzend MDO-Äquivalente (E- & Bio-Diesel) sowie E- und Bio-NG begrenzt werden.

Diese Kraftstoffoptionen wurden anschließend Teil einer Kostenschätzung für die jährlich wiederkehrenden Gesamtkosten für den Fährbetrieb. Die Kostenschätzung hat gezeigt, dass vor allem die E-Varianten alternativer Kraftstoffe kurz- bis mittelfristig zu hohen Betriebskosten führen. Bio-Kraftstoffe sind bis 2030 günstiger und führen demzufolge auch zu geringeren jährlichen Kosten des Fährbetriebs. Als kostengünstigste Option ergab sich der Einsatz von Bio-Diesel.

Synthetische Diesel-Äquivalente sind in ihrer Herstellung aufgrund der Komplexität der Zusammensetzung des Kraftstoffes im Vergleich zu anderen alternativen Kraftstoffen als aufwendig zu bewerten. Sie befinden sich demzufolge häufig eher im hochpreisigen Kraftstoffsegment. Von Vorteil ist jedoch, dass eine auf einen Dieselantrieb ausgelegte Fähre eine große Flexibilität hinsichtlich der ‚Kraftstofffarbe‘ aufweist. Es ist mit einer solchen Fähre möglich, auf die Marktverfügbarkeit von E- oder Bio-Fuels zu reagieren und als Rückfallebene jederzeit wieder auf den Einsatz herkömmlichen Diesels umstellen zu können. Sollte eine Fähre innerhalb der nächsten fünf Jahre etabliert werden, ist die Reaktionsfähigkeit auf Marktverfügbarkeiten und damit verbundenen Preisschwankungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit ein wichtiger Faktor.

Auch die technologische Reife von Antriebs- und Tanksystemen hat wesentlichen Einfluss auf die Wahl eines Fährschiffes. Dabei ist der avisierte Zeitraum für eine potenzielle Anschaffung oder Umrüstung ebenso ausschlaggebend wie die maximal für die Anschaffung zur Verfügung stehenden CapEx. Bei zeitnaher Etablierung einer Fährverbindung ist davon auszugehen, dass nur unter erheblichem finanziellem Mehraufwand ein Schiff mit alternativem Antrieb angeschafft oder entsprechend umgerüstet werden kann bzw. viele der Antriebs- und Tanktechnologien noch nicht am Markt verfügbar sind. Auch in die nötigen Infrastrukturen müsste deutlich investiert werden. Daher ist kurzfristig die Anschaffung eines Schiffes mit herkömmlichem Antriebssystem voraussichtlich eine finanziell attraktive Option. Langfristig muss jedoch berücksichtigt werden, dass entweder erneut hohe CapEx für eine Umrüstung des Antriebs- und Tanksystems auf die Nutzung alternativer Kraftstoffe oder hohe OpEx für den Einkauf teurer E-Fuels anfallen. Demzufolge sollte neben den reinen Investitionskosten die voraussichtliche Einsatzzeit des Schiffes einen Einfluss auf eine mögliche Entscheidung haben.

6. Quellenverzeichnis

- [01] **Süddeutsche Zeitung GmbH:** Schifffahrt – Cuxhaven - Keine Förderung für Elb-Link: Fährgesellschaft vor dem Aus?; 21. November 2017.
- [02] **sh:z Schleswig-Holsteinischer Zeitungsverlag GmbH & Co. KG:** Fährverbindung Brunsbüttel/Cuxhaven - Endgültiges Aus für Elbfähre; 27. November 2017.
- [03] **CPL Competence in Ports and Logistics GmbH:** Perspektivpapier für den Hafen Cuxhaven; Stand September 2019.
- [04] **Clarkson Research Services Ltd.:** World Fleet Register; Stand April 2024.
- [05] **MarineTraffic™:** Ship Tracking; Stand April 2024.
- [06] **Süddeutsche Zeitung GmbH:** Schifffahrt - Brunsbüttel - Cuxhaven-Brunsbüttel: Elbfähre stellt Betrieb ein; 15. Dezember 2021.
- [07] **Oceantrade Media Private Limited:** Fiskerstrand Verft AS signs new contract for the conversion of the car ferry MF Fanafjord; 25. November 2023.
- [08] **FleetMon:** Ship Tracking; Stand Dezember 2021.
- [09] **Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt:** Digitale Bundeswasserstraßenkarte 1:1000 000; Stand April 2024.
- [10] **Baltic Marine Consult GmbH:** Verkehrsuntersuchung zur Fährverbindung Cuxhaven – Brunsbüttel: Ermittlung des Verkehrsaufkommens und Auslegung des Fährsystems; Stand April 2013.
- [11] **Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt:** Seeschiffahrtsstraßen-Ordnung (SeeSchStrO) – § 26 Fahrgeschwindigkeit; Stand April 2024.
- [12] **FRS Helgoline GmbH & Co. KG:** FRS Helgoline bietet ab 03.04.2024 zusätzlich Fahrten mit dem HSC „Halunder Jet“ ab Brunsbüttel nach Cuxhaven und Helgoland an; 6. Februar 2024.
- [13] **Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee:** Schifffahrtspolizeiliche Genehmigungen, Verfügungen und Befreiungen; Stand April 2024.
- [14] **Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt:** Fünfte Bekanntmachung zur Änderung der Bekanntmachung der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt Außenstelle Nord zur Seeschiffahrtsstraßen-Ordnung; 6. Dezember 2018.

- [15] **Merkel Energy GmbH**: Potenzialanalyse: LNG-Infrastruktur an der deutschen Nordseeküste unter Betrachtung besonders geeigneter Standorte; Stand Oktober 2017.
- [16] **Google Earth**: Satellitenbild; Stand September 2016.
- [17] **J.F. Zeller GmbH & Co. KG (Zevener Zeitung)**: CUXHAVEN - War es das schon? Norwegen-Fähre in Not, Betrieb eingestellt; 31. August 2023.
- [18] **ADAC**: XTL, HVO-Diesel & Co.: Neue Kraftstoffe ab 2024; 02 April 2024.
- [19] **Nordic Roadmap**: Future Fuels for Shipping - Life Cycle Assessment of Marine Fuels in the Nordic Region; 28. April 2023.
- [20] **Ship & Bunker**: Rotterdam Bunker Prices – LSMGO is Max 0.10% Sulfur Distillate (DMA, DMZ) for Compliance with 2015 ECA Regulations; Stand Mai 2024.
- [21] **Ship & Bunker**: Rotterdam Bunker Prices – MEOH is the price per tonne of pure conventional / grey methanol; Stand Mai 2024.
- [22] **Ship & Bunker**: Rotterdam Bunker Prices – LNG is the USD price for one metric tonne of LNG; Stand Mai 2024.
- [23] **Greg Molnár**: 2023 was another wild ride for gas markets. and the 5 key developments for me are; Stand Januar 2024.
- [24] **S&P Global Commodity Insights**: Platts Ammonia Price Chart - Monthly average price, May 2023 (\$/mt); Stand Mai 2024.
- [25] **DNV and ARGUS**: Fuel Prices; Stand Mai 2024.
- [26] **S&P Global Commodity Insights**: Price Assessment - Platts Hydrogen Assessments; Stand Mai 2024.
- [27] **S&P Global Commodity Insights**: Platts hydrogen price wall; Stand Mai 2024.
- [28] **Methanol Market Services Asia**: Global Methanol Pricing Comparison; Stand März 2024.
- [29] **EEX**: Green HYDRIX; Stand Mai 2024.
- [30] **ERS Elbfähre**: Die Fährlinie der Zukunft, Umweltfreundliche Mobilität in Norddeutschland; Stand April 2023.
- [31] **Bundesministerium für Digitales und Verkehr**: Beschränkung der Nutzung von Straßentunneln gemäß Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR); Stand März 2024.

- [32] **Bundesministerium der Justiz:** Verordnung über Ausnahmen von den Vorschriften über die Beförderung gefährlicher Güter (Gefahrgut-Ausnahmereverordnung - GGAV 2002); Stand Juni 2023.