

CLIMATE CHANGE

21/2024

Abschlussbericht

Begleitung der kraftstoffbezogenen Legislativvorhaben auf europäischer Ebene und Konzeption der Umsetzung in nationales Recht

FuelEU Maritime, ReFuelEU Aviation, RED

von:

Nora Wissner, Martin Cames, Jürgen Sutter
Öko-Institut, Berlin

Alessia De Vita, Pelopidas Siskos,
Ioannis Tsiropoulos

E3 Modelling, Athen

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 21/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3721 57 105 0
FB001348

Abschlussbericht

Begleitung der kraftstoffbezogenen Legisla- tivvorhaben auf europäischer Ebene und Konzeption der Umsetzung in nationales Recht

FuelEU Maritime, ReFuelEU Aviation, RED

von

Nora Wissner, Martin Cames, Jürgen Sutter
Öko-Institut, Berlin

Alessia De Vita, Pelopidas Siskos,
Ioannis Tsiropoulos
E3 Modelling, Athen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Borkumstr. 2
13189 Berlin

Abschlussdatum:

November 2023

Redaktion:

Fachgebiet I 2.7 Kraftstoffe und Energie im Verkehr
Juliane Bopst

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Juni 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Begleitung der kraftstoffbezogenen Legislativvorhaben auf europäischer Ebene und Konzeption der Umsetzung in nationales Recht

Auf europäischer Ebene werden im Kontext des Fit-for-55-Paketes verschiedene Legislativvorhaben diskutiert, die einen Bezug zur Kraftstoffnutzung im Luft- und Seeverkehr haben. Das Ziel des Projektes ist es diese Vorhaben und ggf. deren Umsetzung in nationales Recht zu begleiten. Dieser Bericht fasst die Arbeiten im Projekt zusammen. Die Modellierung verschiedener Szenarien zeigt, dass die Kombination von Multiplikatoren und Quoten für Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs (RFNBOs), sowie einer Steigerung der Reduktionsziele, in den größten Emissionsminderung und höchsten RFNBO-Mengen bis 2050 resultiert. Die Vertiefungsstudien beleuchten im Detail verschiedene Aspekte der Nutzung zukünftiger Kraftstoffe. E-Methanol und E-Ammoniak sind die vielversprechendsten Kraftstoffoption für eine breite Nutzung in der Hochseeschifffahrt. Es zeigt sich, dass klare politische Vorgaben und Maßnahmen ideal sind, um langfristige Investitionen tätigen zu können, die für die Nutzung von zukünftigen Kraftstoffen nötig sind. Aufgrund der verschiedenen Eigenschaften zukünftiger Kraftstoffe und der weiterhin bestehender Unsicherheit über zukünftige Entwicklungen ist es nötig Politikinstrumente so zu gestalten, dass den Schiffsunternehmen Flexibilität gewährleistet wird.

Abstract: Support of fuel-related legislative projects at European level and conception of implementation in national law

At the European level, various legislative projects are being discussed in the context of the Fit-for-55 package that relate to fuel use in aviation and maritime transport. The aim of the project is to accompany these projects and, if necessary, their implementation in national law. This report summarises the work done in the project. The modelling of different scenarios shows that the combination of multipliers and RFNBO quotas, as well as an increase in reduction targets, results in the largest emission reductions and highest RFNBO quantities by 2050. The in-depth studies highlight in detail different aspects of the use of future fuels. E-methanol and e-ammonia are the most promising fuel options for widespread use in deep-sea shipping. It can be seen that clear policies and measures are ideal to make long-term investments necessary for the use of future fuels. Due to the different characteristics of future fuels and the continuing uncertainty about future developments, it is necessary to design policy instruments in a way that ensures flexibility for shipping companies.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis.....	10
1 Einleitung.....	24
2 Quantifizierung verschiedener Szenario-Annahmen zum FuelEU Maritime Legislativvorschlag	25
2.1 Einleitung.....	25
2.2 Annahmen zur Modellierung.....	26
2.2.1 Politischer Kontext.....	26
2.2.2 Kraftstoffarten und Kraftstoffpreise.....	26
2.2.3 Emissionsfaktoren.....	27
2.2.4 Verfügbarkeit von Biokraftstoffen.....	28
2.2.5 Modellierung von Multiplikatoren.....	28
2.3 Definition der Szenarien.....	29
2.3.1 Szenario 1: RFNBO-Unterquote.....	29
2.3.2 Szenario 2: Kurzfristig niedrige RFNBO-Multiplikatoren.....	29
2.3.3 Szenario 3: Kurz- und langfristig hohe RFNBO-Multiplikatoren.....	30
2.3.4 Szenario 4: Kurzfristig hohe RNFBO-Multiplikatoren, langfristig RFNBO-Unterquote, ergänzt durch ehrgeizigere Treibhausgasintensitätsziele.....	30
2.3.5 Sensitivität zu Szenario 4: Kurzfristig hohe RFNBO-Multiplikatoren, langfristig RFNBO-Unterquote, ergänzt durch ehrgeizigere THG-Intensitätsminderungsziele, niedrigere RFNBO-Preise und höhere Biokraftstoffpreise.....	31
2.4 Ergebnisse des Szenarios.....	31
2.4.1 Energieeinsatz.....	31
2.4.2 Emissionen.....	34
2.4.3 Kosten.....	36
2.5 Fazit.....	37
3 Vertiefungsstudien und Stakeholder-Interviews.....	39
3.1 Produktion und landseitige Aspekte zukünftiger Kraftstoffe.....	39
3.2 Schiffsseitige Voraussetzungen zukünftiger Kraftstoffe.....	40
3.3 Lebenszyklusemissionen zukünftiger Kraftstoffe.....	41
3.4 Fazit.....	42
4 Schlussfolgerungen.....	44
5 Quellenverzeichnis.....	46

A Anhang 47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verbrauch von Biokraftstoffen und RFNBOs und Anteil am Kraftstoffmix im internationalen Seeverkehr im Jahr 2030 in den verschiedenen Szenarien.....	13
Abbildung 2:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im internationalen Seeverkehr im Zeitraum 2020 bis 2050 auf WTW-Basis (einschließlich Schlupf).....	14
Figure 3:	Biofuels and RFNBOs consumption and contribution in the fuel mix used in international maritime in 2030 across the scenarios	19
Figure 4:	GHG emissions trajectory from international maritime in the period 2020 to 2050 on a WTW basis (including slippage)	21
Abbildung 5:	Bandbreite des Energieverbrauchs im internationalen Seeverkehr in den Szenarien für den Zeitraum 2020 und 2050	32
Abbildung 6:	Verbrauch von Biokraftstoffen und RFNBOs und Anteil am Kraftstoffmix im internationalen Seeverkehr im Jahr 2030 in den verschiedenen Szenarien.....	33
Abbildung 7:	Verbrauch von Biokraftstoffen und RFNBOs und Anteil am Kraftstoffmix im internationalen Seeverkehr im Jahr 2050 in den verschiedenen Szenarien.....	34
Abbildung 8:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im internationalen Seeverkehr im Zeitraum 2020 bis 2050 auf WTW-Basis (einschließlich Schlupf).....	35
Abbildung 9:	Kumulative Emissionen des internationalen Seeverkehrs im Zeitraum 2021 - 2050 auf WTW-Basis (ohne Schlupf)	36
Abbildung 10:	Gesamtsystemkosten im internationalen Seeverkehr in den Szenarien	36
Abbildung 11:	Gesamtkraftstoffkosten im internationalen Seeverkehr in den Szenarien	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ziele für die Treibhausgasintensität des im internationalen Seeverkehr verwendeten Kraftstoffmixes im Rahmen des Legislativvorschlags „FuelEU Maritime“ im Zusammenhang mit dem Maßnahmenpaket „Fit For 55“	25
Tabelle 2:	Entwicklung der Preise im EU-ETS.....	26
Tabelle 3:	In der Modellierung verwendete zentrale Kraftstoffpreise in €/toe	27
Tabelle 4:	Für die Modellierung verwendete WTW-Emissionsfaktoren (ohne Schlupf) ^a	28

Tabelle 5:	Überblick über die modellierten Szenarien.....	29
Tabelle 6:	Entwicklung der Unterquoten für RFNBOs im internationalen Seeverkehr in Szenario 1	29
Tabelle 7:	RFNBO-Unterquote in Szenario 4.....	30
Tabelle 8:	Ziele für die Treibhausgasintensitätsminderung des im internationalen Seeverkehr verwendeten Kraftstoffmixes in Szenario 4	30
Tabelle 9:	Relativer Preisunterschied der alternativen Schiffskraftstoffe im Jahr 2030 und 2050 im Sensitivitätsszenario im Vergleich zu den zentralen Preisannahmen (Preisniveaus in Klammern)	31

Abkürzungsverzeichnis

DAC	Direct Air Capture
EC	Europäische Kommission
ETS	Emission Trading System
EU	Europäische Union
ILUC	Indirect Land-Use Change
LNG	Liquified Natural Gas
RED	Renewable Energy Directive
RFNBOs	Renewable Fuels of Non-Biological Origin
MGO	Marine Gas or Diesel Oil
MRV	Monitoring, Reporting and Verification
THG	Treibhausgas
TTW	Tank-to-Wake
UBA	Umweltbundesamt
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wake

Zusammenfassung

Der Luft- und Seeverkehr tragen zusammen 5-6 % zu den globalen CO₂-Emissionen bei. Vor der Covid-19 Pandemie stiegen die Emissionen in beiden Sektoren. Zur Minderung der Emissionen in beiden Sektoren stehen verschiedene Optionen zur Verfügung. Neben Effizienzverbesserungen stellt die Nutzung alternativer klimaneutraler Kraftstoffe den größten Hebel dar. Da die Emissionen beider Sektoren stark an das globale wirtschaftliche Wachstum und Trends im Konsumverhalten gekoppelt sind, sind auch Maßnahmen in Betracht zu ziehen, die eine Nachfrageminderung anreizen. Trotz ihres großen Potenzial zur Emissionsreduktion finden nachhaltige, alternative Kraftstoffe in beiden Sektoren jedoch derzeit kaum Verwendung. Bisher sind die Klimawirkungen des Luft- und Seeverkehr nämlich kaum reguliert. Während auf internationaler Ebene die Verhandlungen zu globalen Politikinstrumenten andauern, geht die Europäischen Union (EU) nun mit neuen Initiativen voran.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Verhandlungen zu den drei kraftstoffbezogenen Legislativvorhaben zu begleiten. Die Vorhaben sind im Rahmen des European Green Deal und des EU-Klimaziels für die langfristige Klimapolitik und Klimaziele der EU zu betrachten. Zudem spielt die von der Europäischen Kommission (EC) im Jahr 2020 veröffentlichte Mobilitätsstrategie (Sustainable and Smart Mobility Strategy) eine Rolle. Diese Strategie enthält einen Aktionsplan mit über 80 Initiativen, die bis 2024 umgesetzt werden sollen. Für die Energie- bzw. Kraftstoffversorgung des Verkehrs sind insbesondere die drei zu Anfang genannten Initiativen relevant. Zur Umsetzung des European Green Deal hat die EC am 14. Juli 2021 eine Reihe von Legislativvorschlägen im Rahmen des Fit-for-55-Pakets veröffentlicht, welches die Entwürfe FuelEU Maritime und ReFuelEU Aviation enthält.

Das Forschungsvorhaben hat das Trilogverfahren des Europäischen Parlaments und des Europäischen Rates begleitet. Es wurden umfangreich verschiedene Ausgestaltungen der FuelEU Maritime Initiative modelliert. Außerdem wurden kraftstoffspezifische Forschungsfragen basierend auf Literaturrecherchen und Interviews mit Experten und Expertinnen in Vertiefungsstudien adressiert.

Modellierung FuelEU Maritime Ausgestaltung

Die Initiative FuelEU Maritime zielt darauf ab, die Emissionen des Seeverkehrs zu reduzieren, um einen Beitrag zu den Gesamtanstrengungen zur Verringerung der Treibhausgas (THG) -emissionen zu leisten: Ziel ist es, die Verwendung alternativer Schiffskraftstoffe im Laufe der Zeit zu erhöhen. Alternative Schiffskraftstoffe umfassen in der Modellierung Biokraftstoffe, erneuerbare Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs (RFNBOs) sowie die Nutzung von Elektrizität. Der Modellierung zugrunde liegende Kommissionsvorschlag für FuelEU Maritime sieht vor, die Treibhausgasintensität der im Seeverkehr verwendeten Kraftstoffe (einschließlich Elektrizität) im Laufe der Zeit gegenüber der Treibhausgasintensität der im Jahr 2020 verwendeten Kraftstoffe zu verringern: -2 % in 2025, -6 % in 2030, -13 % in 2035, -26 % in 2040, -59 % in 2045, -75 % in 2050. Die Anforderung gilt für den Energieverbrauch am Liegeplatz, den Energieverbrauch bei allen Fahrten innerhalb der EU und bei 50 % der Strecke von Fahrten außerhalb der EU. Im EC-Vorschlag wird der Beitrag verschiedener alternativer Schiffskraftstoffe (z. B. Biokraftstoffe, E-Fuels) nicht auf der Grundlage verbindlicher Regelungen (z. B. Unterkontingente) oder sonstiger Regelungen festgelegt, sondern es wird ein zielbasierter Ansatz verfolgt, bei dem die Betreiber Kraftstoffe und Technologien frei wählen können, um die Ziele zu erreichen.

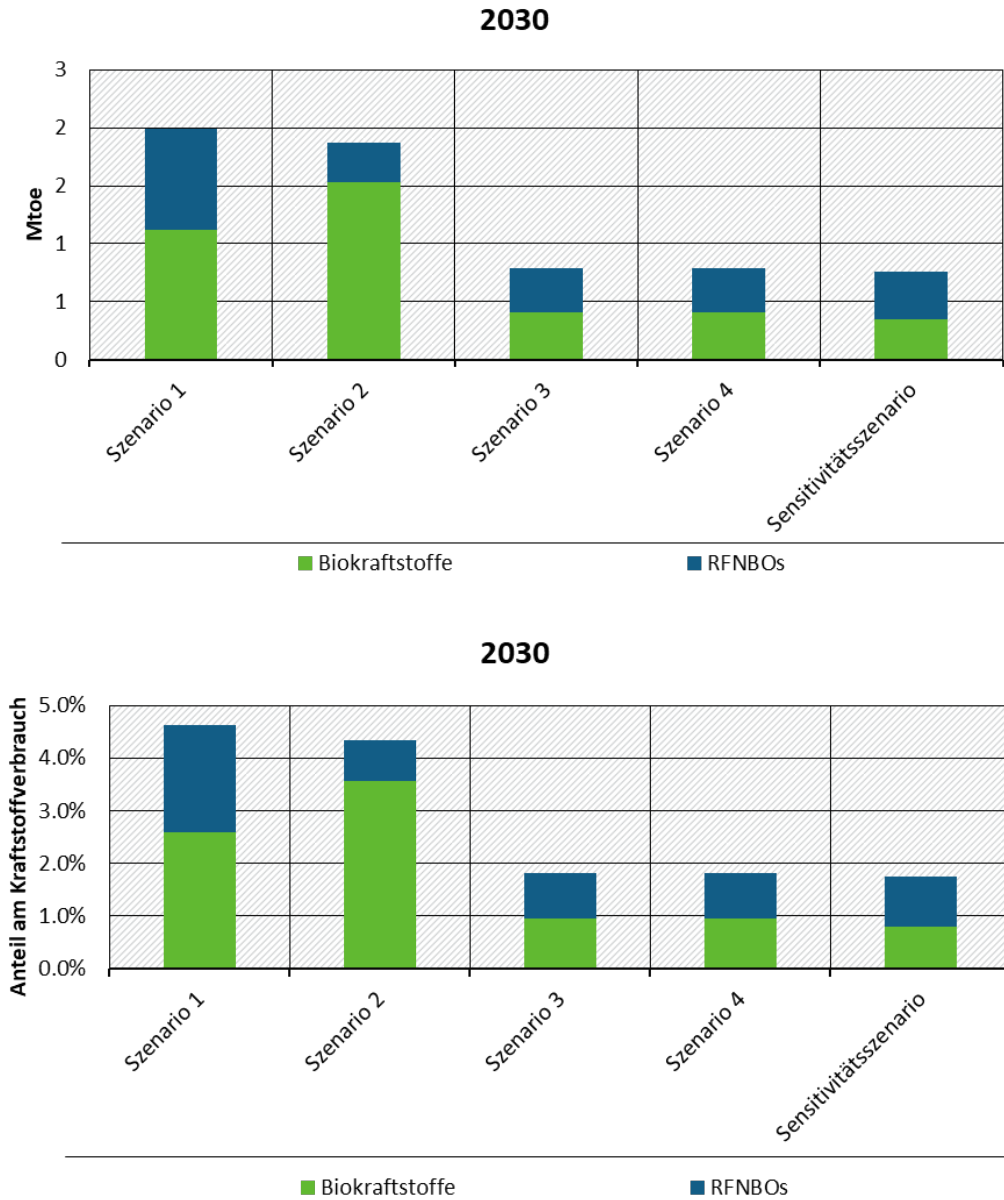
Im Rahmen des Vorhabens wurden alternative Szenario-Annahmen definiert, die sich vom FuelEU Maritime Vorschlag dadurch unterscheiden, dass sie Unterquoten und/oder Multiplikatoren für bestimmte alternative maritime Kraftstoffe vorsehen, , und/oder das Ambitionslevel

der Treibhausgasintensitätsreduktion bis zum Jahr 2050 erhöhen. Es wurden insgesamt vier Szenarien und ein zusätzliches Preissensitivitätsszenario quantifiziert. Diese Szenarien wurden mithilfe des PRIMES-Maritime-Modells quantifiziert, das Projektionen für den Kraftstoffverbrauch nach Kraftstoffart, THG-Emissionen (über die gesamte Kette, d. h. Well-to-Tank (WTT), Tank-to-Wake (TTW), Well-to-Wake (WTW)) und Gesamtkosten liefert.

Die Projektionen zeigen, dass sich der Energieverbrauch in den verschiedenen Szenarien nicht wesentlich unterscheidet.

Abbildung 1 zeigt den Verbrauch von Biokraftstoffen und erneuerbaren Kraftstoffen nicht-biogenen Ursprungs (Renewable Fuels of non-biological Origin, RFNBOs) und ihren Anteil am Gesamtkraftstoffverbrauch im Jahr 2030 in den verschiedenen Szenarien. Der Verbrauch von Biokraftstoffen und RFNBOs erreicht etwa 2 Mio. toe in Szenario 1 und 1,9 Mio. toe in Szenario 2 (oder etwa 4,6 % bzw. 4,3 % des gesamten Kraftstoffverbrauchs), um das Ziel der Treibhausgasintensitätsreduktion im Jahr 2030 zu erreichen. Die Szenarien unterscheiden sich darin, dass Szenario 1 eine Quote für den Verbrauch von RFNBOs (2 % im Jahr 2030) vorsieht, was zu etwa 0,9 Mio. toe führt, dem höchsten Wert aller Szenarien. Die Multiplikatoren von Szenario 2 führen nicht zu einer höheren Akzeptanz von RFNBOs, da der Preisunterschied zu Biokraftstoffen im Jahr 2030 immer noch erheblich ist. Andererseits erhöhen höhere Multiplikatoren im Jahr 2030, wie sie in Szenario 3 und Szenario 4 (und im Sensitivitätsszenario) enthalten sind, den relativen Anteil von RFNBOs an den alternativen maritimen Kraftstoffen (auf 48 - 54 %), aber ihre absolute Menge steigt nur geringfügig im Vergleich zu Szenario 2 (d. h. um etwa 35 ktoe oder 10 %). Der Grund dafür ist, dass hohe Multiplikatoren die erforderlichen Mengen alternativer maritimer Kraftstoffe (Biokraftstoffe und RFNBOs) zur Erreichung des THG-Intensitätsminderungsziels auf etwa 0,8 Mio. toe (im Vergleich zu etwa 2 Mio. toe in Szenario 1 und 2) reduzieren, da RFNBOs bei der Erreichung des Ziels stärker berücksichtigt werden. Der Beitrag alternativer maritimer Kraftstoffe (Bio-kraftstoffe und RFNBOs) liegt bei den Szenarien mit hohen Multiplikatoren im Jahr 2030 unter 2 %. Es sollte angemerkt werden, dass im Rahmen der Modellierung keine Gesamtsystemanalyse durchgeführt wurde, um die Aufteilung der vorhandenen, nachhaltigen Biomasse, auf verschiedene Sektoren abzuschätzen.

Abbildung 1: Verbrauch von Biokraftstoffen und RFNBOs und Anteil am Kraftstoffmix im internationalen Seeverkehr im Jahr 2030 in den verschiedenen Szenarien



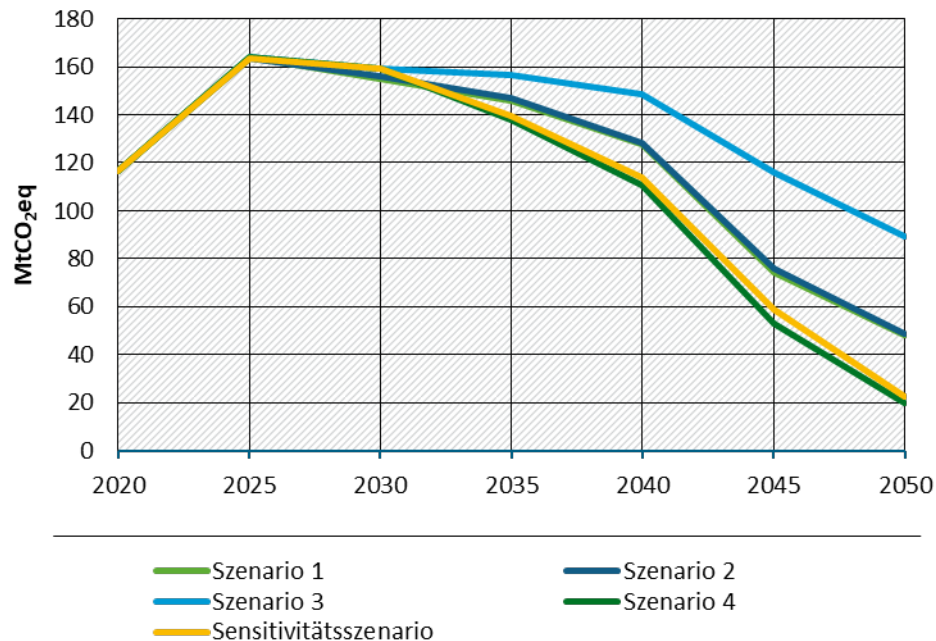
Quelle: eigene Darstellung, E3M

Im Jahr 2050 sind zwischen den Szenarien erhebliche Unterschiede beim Verbrauch und Anteil alternativer Schiffskraftstoffe (Biokraftstoffe und RFNBOs) am Gesamtkraftstoffverbrauch im internationalen Seeverkehr festzustellen. Während in Szenario 2 Biokraftstoffe dominieren, ist der Anteil von RFNBOs in allen anderen Szenario im Jahr 2050 wesentlich höher.

Die Entwicklung der THG-Emissionen des internationalen Seeverkehrs ist in den verschiedenen Szenarien unterschiedlich (Abbildung 2). Insbesondere Szenario 4 (und das auf Szenario 4 basierende Sensitivitätsszenario) erreichen die niedrigsten Emissionen im Jahr 2050 (rund 20 bzw. 25 MtCO₂eq), was auf die deutliche Erhöhung des THG-Intensitätsminderungsziels zurückzuführen ist (d. h. 90 % gegenüber 75 % in allen anderen Szenarien). Szenario 1 und Szenario 2 erreichen im Jahr 2050 ein ähnliches Emissionsniveau (rund 48 MtCO₂eq), da sie beide ein THG-Intensitätsminderungsziel von 75 % ohne den Beitrag von Multiplikatoren zu diesem Ziel

erreichen. Im Gegensatz dazu wird in Szenario 3 dasselbe Ziel mit Multiplikatoren erreicht, so dass das Emissionsniveau im Jahr 2050 wesentlich höher ist (d. h. etwa 85 MtCO₂eq).

Abbildung 2: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im internationalen Seeverkehr im Zeitraum 2020 bis 2050 auf WTW-Basis (einschließlich Schlupf)



Quelle: eigene Darstellung, E3M

Gesamtkosten (bestehend aus Kraftstoffkosten, Kapitalkosten, Betriebskosten und variablen Nicht-Kraftstoffkosten) unterscheiden sich in den verschiedenen Szenarien vor allem aufgrund des Anteils der Kraftstoffkosten, der durch den Kraftstoffmix beeinflusst wird.

Die modellierten Szenarien bieten alternative Wege zur Erreichung bzw. Übererfüllung der Ziele der FuelEU Maritime Initiative durch die Einführung von Unterquoten und Multiplikatoren, die RFNBOs fördern und gleichzeitig die Treibhausgasintensitätsminderungsziele des Kraftstoffmixes erreichen.

Unterquoten sind ein starkes Signal an die Kraftstofflieferanten und ermöglichen so eine höhere Marktdurchdringung von RFNBOs im internationalen Seeverkehr und eine geringere Nachfrage nach anderen alternativen maritimen Kraftstoffoptionen wie Biokraftstoffe (Szenario 1, Szenario 4 langfristig). Die ausschließliche Berücksichtigung von Multiplikatoren bei der Förderung von RFNBOs kann zu höheren Emissionen führen, da die tatsächliche Verbesserung der Treibhausgasintensität des Kraftstoffmixes geringer ist als in anderen Szenarien. Außerdem wird die ausschließliche Verwendung von Multiplikatoren langfristig zu höheren Anteilen fossiler Kraftstoffe führen, die trotzdem aufgrund steigender CO₂-Preise teurer werden (Szenario 3). Die Kombination von Multiplikatoren auf kurze Sicht und Unterquoten für RFNBOs auf längere Sicht mit ehrgeizigeren Zielen für die Treibhausgasintensitätsminderung des internationalen maritimen Kraftstoffmixes führt im Vergleich zu anderen Szenarien zu den niedrigsten Emissionen und einer höheren Marktdurchdringung von RFNBOs, allerdings bei höheren Kraftstoffkosten (Szenario 4).

Vertiefungsstudien zu klimaneutralen Kraftstoffen

Anders als im Luftverkehr stehen im Seeverkehr verschiedene nachhaltige Energieversorgungsoptionen in Konkurrenz. Als Konsequenz kann derzeit keine der Optionen eindeutig

favorisiert werden. Die verschiedenen Kraftstoffoptionen, die im Sektor diskutiert werden, haben alle spezifische Herausforderungen, Vorteile und Trade-offs. Zur Ergänzung der Modellierung und als Hintergrundwissen für die Begleitung der kraftstoffbezogenen Legislativvorhaben, werden folgende Aspekte anhand einer umfangreichen Literaturrecherche sowie Interviews mit Experten und Expertinnen in separaten Vertiefungsstudien beleuchtet:

- ▶ Die Eigenschaften, Produktionsprozesse, Produktionskosten und landseitige Infrastruktur zukünftiger Kraftstoffe;
- ▶ Die technischen Aspekte an Bord, inkl. Lagerung, Sicherheit, Kompatibilität von Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle mit den Kraftstoffen, Emissionen und schiffsseitigen Kosten;
- ▶ Die Lebenszyklusemissionen zukünftiger Kraftstoffe.

Die Vertiefungsstudien wurden als separate Publikationen veröffentlicht und sind in diesem Bericht zusammenfassend dargestellt.¹ Im Rahmen der Vertiefungsstudien werden folgende Kraftstoffoptionen einbezogen: RFNBOs und Biokraftstoffe der zweiten Generation bzw. fortschrittlichen Biokraftstoffe. Für jede Vertiefungsstudie wurde eine umfängliche Literaturrecherche sowie Interviews mit Experten und Expertinnen aus Industrie, Forschung und Umweltverbänden durchgeführt.

Im Allgemeinen stellen die Kraftstoffe, die den heutigen fossilen Schiffskraftstoffen am wenigsten ähneln, die größten Herausforderungen dar. Während dieselähnliche synthetische Kraftstoffe und Biokraftstoffe in vielerlei Hinsicht wie heutige fossile Kraftstoffe behandelt werden können, werden Biokraftstoffe und E-Diesel bis 2050 voraussichtlich die teuerste und (insbesondere Biodiesel) die am wenigsten verfügbare Kraftstoffoption sein. Nachhaltige Biokraftstoffe² können aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit und der unsicheren Treibhausgasbilanzierung langfristig keinen nennenswerten Beitrag zur Dekarbonisierung des globalen Sektors leisten. Kurzfristig können Biokraftstoffe jedoch einen Beitrag zur Emissionsminderung leisten, da sie zeitnah verfügbar sind als RFNBOs.

Unter Berücksichtigung sowohl der landseitigen als auch der schiffsseitigen Aspekte erscheinen E-Methanol und E-Ammoniak als die Kraftstoffe mit den besten Aussichten, erhebliche Marktanteile im Kraftstoffmarkt für den internationalen Seeverkehr zu gewinnen. Während für Ammoniak günstigere Produktionskosten als für Methanol erwartet werden, ist die Verwendung von Ammoniak teilweise noch unklar oder problematisch (sichere Handhabung an Bord und im Hafen, Toxizität, Verfügbarkeit von Motoren und TTW-Emissionen). Es muss sichergestellt werden, dass über den gesamten Lebenszyklus möglichst wenig Treibhausgasemissionen entstehen, damit zukünftige Kraftstoffe einen Beitrag zur Dekarbonisierung des Seeverkehrs beitragen können. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die (zusätzliche) Bereitstellung von erneuerbarem Strom/Energie und einer nachhaltigen CO₂-Quelle. Flüchtige Emissionen durch Leckagen und Schlupf stellen vor allem bei gasförmigen Kraftstoffe ein Risiko dar. Darüber hinaus ist aufgrund der absehbar begrenzten Kapazität erneuerbarer Energien der kumulierte Energieaufwand der verschiedenen Herstellungspfade zu berücksichtigen. Klare Vorgaben für die Ermittlung von

¹ 1. Vertiefungsstudie – Produktion und landseitige Aspekte zukünftige Kraftstoffe: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/in-depth-analysis-1-future-fuels>

2. Vertiefungsstudie – Schiffseitige Voraussetzungen zukünftiger Kraftstoffe: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/in-depth-analysis-2-technical-aspects-of-future>

3. Vertiefungsstudie – Lebenszyklusemissionen zukünftiger Kraftstoffe: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/in-depth-analysis-3-lifecycle-emissions-of-future>.

² Biokraftstoffe, die die Nachhaltigkeitskriterien der RED erfüllen

Lebenszyklusemissionen und robuste Zertifizierungssysteme sind notwendig, um die zuvor genannten Aspekte zu adressieren.

Im Diskurs mit Experten und Expertinnen wird deutlich, wo einerseits Unsicherheiten und Forschungsbedarf bestehen (TTW-Emissionen, zukünftiger Verfügbarkeit und Kraftstoffkosten) und dass andererseits klare politische Vorgaben und Maßnahmen gewünscht werden, um langfristige Investitionen tätigen zu können. Außerdem zeigt auch die Literaturrecherche, dass Politikinstrumente so gestaltet werden müssen, dass die verschiedenen Marktsegmente und Schiffstypen im Seeverkehr die für sich beste klimaneutrale Energieversorgungsoptionen wählen können. Die beste Kraftstoffoption für ein Hochseecarrierschiff ist nicht unbedingt die beste Option für Küstenfähre.

Fazit

Die höchsten Emissionsminderungen und eine höhere Marktdurchdringung von RFNBOs kann auf Basis der Modellierung durch die Kombination von Multiplikatoren auf kurze Sicht und Unterquoten für RFNBOs auf längere Sicht mit ehrgeizigeren Zielen für die Treibhausgasintensitätsminderung des internationalen maritimen Kraftstoffmixes erzielt werden. Die finale Einigung des Trilogs zur FuelEU Maritime Verordnung spiegelt die abgeleitete Empfehlung der Modellierung zumindest teilweise wider. Das Trilogergebnis enthält ambitioniertere Ziele für die Senkung der Treibhausintensität, einen kurzzeitigen RFNBO-Multiplikator bis 2033 und eine konditionale Unterquote für RFNBOs Mitte der 2030er Jahre. Auf Basis der Modellierung kann argumentiert werden, dass eine Einführung einer Unterquote eine bessere Marktdurchdringung von RFNBOs sichern kann durch eine erhöhte Rechts- und Mengensicherheit für Investitionen. Zukünftige, geplante Revisionen der Verordnung könnten dies berücksichtigen.

Die Vertiefungsstudien haben sich mit verschiedenen Aspekten zukünftiger, alternativer Kraftstoffe für den Seeverkehr befasst. Hierbei wurden die Vor- und Nachteile der ausgewählten nachhaltigen Biokraftstoffe und RFNBOs erläutert und was dies für die Instrumentengestaltung bedeutet. E-Methanol und E-Ammoniak scheinen die größte Chance zu haben, substantielle Marktanteile im Kraftstoffmarkt für den internationalen Seeverkehr zu erlangen, wenn sowohl landseitige und schiffseitige Aspekte betrachtet werden. Nachhaltige Biokraftstoffe sind global nur begrenzt verfügbar und bergen Unsicherheiten bei der Treibhausgasbilanzierung. Somit können sie auf lange Sicht nur einen Teil zur Dekarbonisierung des Sektors beitragen. Die finale Version der FuelEU Maritime Verordnung berücksichtigt diese Vor- und Nachteile verschiedener Schiffskraftstoffe. Sie ist technologieneutral gestaltet, indem sie einen Treibhausgasintensitätsgrenzwert setzt und verschiedene alternative Schiffskraftstoffe angerechnet werden können.

Klare Vorgaben für die Ermittlung von Lebenszyklusemissionen und robuste Zertifizierungssysteme sind wichtig, um die entsprechende Treibhausgasminde rung der Kraftstoffe auch tatsächlich zu erreichen. Die (zusätzliche) Bereitstellung von erneuerbarem Strom/Energie und einer nachhaltigen CO₂-Quelle für die Herstellung von RFNBOs ist von besonderer Bedeutung hierbei. Die neuen Legislativvorhaben der EU gehen hierbei in die richtige Richtung, in dem erneuerbare Kraftstoffe durch die RED bestimmte Standards erfüllen müssen.³ Die FuelEU Maritime Verordnung berücksichtigt durch ihren Well-to-Wake Ansatz auch flüchtige Emissionen durch Schlupf und ermöglicht die Nutzung verschiedener Technologien/Kraftstoffe. Diese Technologieoffenheit erkennt zwar an, dass noch unklar ist, wie sich der Kraftstoffmix langfristig entwickeln wird, aber das Ambitionslevel der Verordnung ermöglicht eine zu lange Nutzung fossiler Kraftstoffe (vor allem LNG mit entsprechendem Methanschlupfrisiko und möglichem „Lock-in“-Effekt).

³ Auch kohlenstoffarme Kraftstoffe müssen den einschlägigen Bestimmungen eines Rechtsakts der Union über die Binnenmärkte für erneuerbare Gase und Erdgas sowie für Wasserstoff genügen und einer Zertifizierung unterliegen.

Für die Eignung eines Kraftstoffs für die Hochseeschifffahrt gibt es viele Faktoren zu berücksichtigen. Dies sind u.a. Kosten, Handhabbarkeit/Kompatibilität, Risiko, Treibhausgasminderung, Verfügbarkeit. Die Vertiefungsstudien zeigen, dass Politikinstrumente so gestaltet werden müssen, dass die verschiedenen Marktsegmente und Schiffstypen im Seeverkehr, die für sie beste klimaneutrale Energieversorgungsoptionen wählen können. Die Ausgestaltung des maritimen EU-ETS und der FuelEU Maritime Verordnung ermöglichen dies. Die Anreize für die in vielerlei Hinsicht vorteilhaften RFNBOs sind jedoch noch ausbaufähig. Der Fokus auf die landseitige Infrastruktur und Produktion von alternativen Kraftstoffen für den Seeverkehr, der sich aus den Vertiefungsstudien ergibt, könnte durch europäische Politikinstrumente noch stärker adressiert werden. . So enthält die Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR) beispielsweise keine Vorgaben bezüglich RFNBOs oder nachhaltiger Biokraftstoffe für den Seeverkehr und in der FuelEU Maritime Verordnung fehlt ein Anreiz ähnlich dem in der ReFuelEU Aviation, der die Kraftstofflieferanten in die Pflicht nimmt oder zumindest Sicherheit schafft (wie z.B. eine klare, längerfristige Quote).

Insgesamt hat das Forschungsvorhaben damit einerseits den politischen Prozess der kraftstoffbezogenen Legislativvorhaben konkret begleitet und andererseits wichtige Erkenntnisse und Aspekte für zukünftige Verbesserungen in Bezug auf alternative Kraftstoffe für den Seeverkehr aufgezeigt.

Summary

Aviation and maritime transport together contribute 5-6 % of global CO₂ emissions. Before the Covid-19 pandemic, emissions in both sectors were increasing. Several options are available to reduce emissions in both sectors. Besides efficiency improvements, the use of alternative carbon-neutral fuels is the biggest lever. As emissions in both sectors are strongly linked to global economic growth and trends in consumer behaviour, measures that encourage a reduction in demand should also be considered. Despite their great potential for reducing emissions, sustainable alternative fuels are currently hardly used in either sector. So far, the climate impacts of aviation and maritime transport have hardly been regulated. While negotiations on global policy instruments are ongoing at the international level, the European Union (EU) is now moving forward with new initiatives.

The aim of the research project was to accompany the negotiations on the three fuel-related legislative projects. The latter are to be considered in the context of the European Green Deal and the EU climate target for the long-term climate policy and climate objectives of the EU. In addition, the Sustainable and Smart Mobility Strategy published by the European Commission (EC) in 2020 plays a role. This strategy contains an action plan with over 80 initiatives to be implemented by 2024. The three initiatives mentioned at the beginning are particularly relevant for the energy and fuel supply of transport. In order to implement the European Green Deal, the EC published a series of legislative proposals on 14th July 2021 as part of the Fit-for-55 package, which includes the drafts FuelEU Maritime and ReFuelEU Aviation.

The research project accompanied the trilogue procedure of the European Parliament and the European Council. Extensive modelling of different designs of the FuelEU Maritime Initiative was carried out. In addition, fuel-specific research questions were addressed in in-depth studies based on literature research and interviews with experts.

Modelling the design of FuelEU Maritime

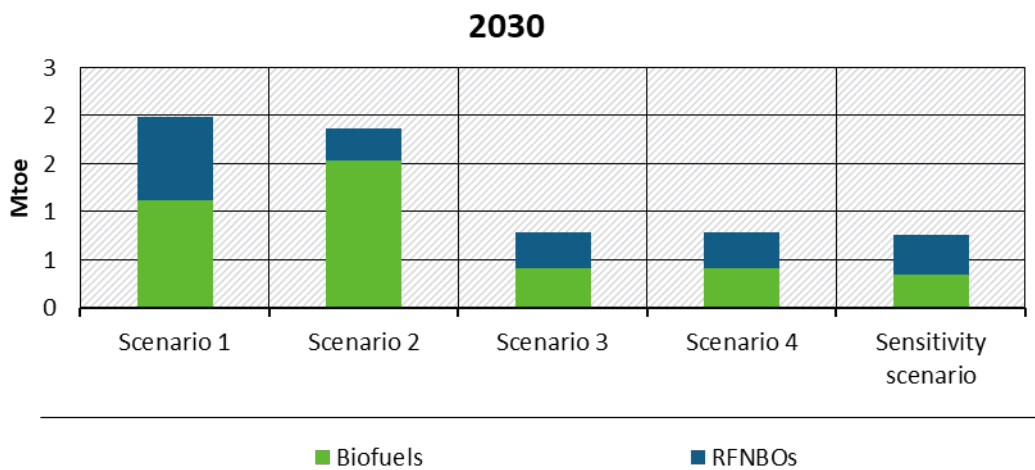
The FuelEU Maritime initiative aims to reduce emissions from maritime transport in order to contribute to the overall effort to reduce greenhouse gas (GHG) emissions: the objective is to increase the use of alternative marine fuels over time. In the modelling, alternative marine fuels include biofuels, renewable fuels of non-biological origin (RFNBOs) and the use of electricity. The EC proposal for FuelEU Maritime is the basis for the modelling and aims to reduce the GHG intensity of fuels (including electricity) used in maritime transport over time compared to the GHG intensity of fuels used in 2020: -2% in 2025, 6% in 2030, -13% in 2035, -26% in 2040, -59% in 2045, -75% in 2050. The requirement applies to energy consumption at berth, energy consumption for all journeys within the EU and for 50% of the distance of journeys outside the EU. In the EC proposal, the contribution of different alternative marine fuels (e.g. biofuels, e-fuels) is not determined on the basis of binding rules (e.g. sub-continentals) or other regulations, but a target-based approach is taken, where operators are free to choose fuels and technologies to achieve the targets.

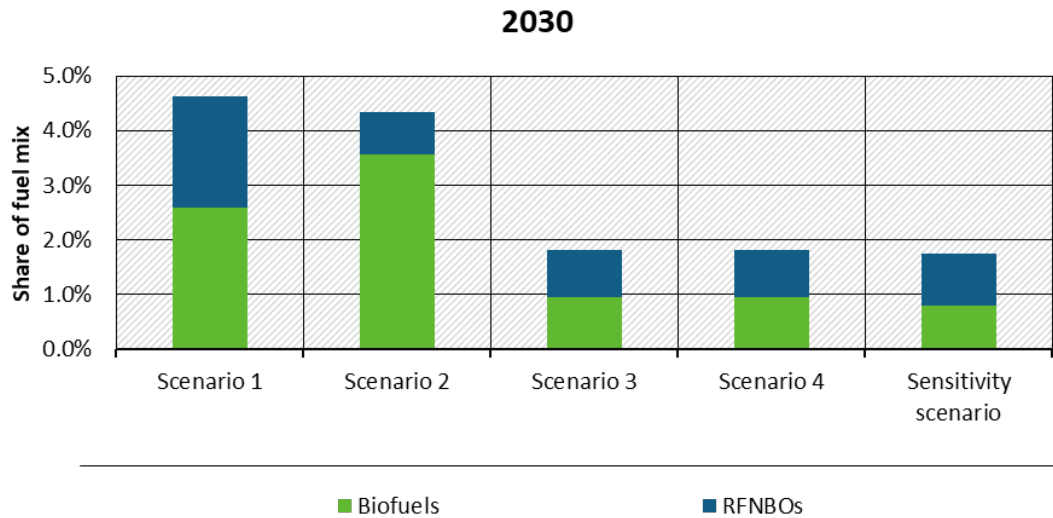
The project defined alternative scenario assumptions that differ from the FuelEU Maritime proposal by providing sub-quotas and/or multipliers for certain alternative maritime fuels and/or by increasing the ambition level of GHG intensity reduction by 2050. A total of four scenarios and one additional price sensitivity scenario were quantified. These scenarios were quantified using the PRIMES Maritime model, which provides projections for fuel consumption by fuel type, GHG emissions (across the whole chain, i.e. well-to-tank (WTT), tank-to-wake (TTW), well-to-wake (WTW)) and total costs.

The projections show that energy consumption does not differ significantly in the different scenarios.

Figure 3 shows the consumption of biofuels and RFNBOs and their share in total fuel consumption in 2030 in the different scenarios. The consumption of biofuels and RFNBOs reaches about 2 million toe in Scenario 1 and 1.9 million toe in Scenario 2 (or about 4.6 % and 4.3 % of total fuel consumption, respectively) to meet the GHG intensity reduction target in 2030. The scenarios differ in that Scenario 1 includes a quota for the consumption of RFNBOs (2 % in 2030), resulting in about 0.9 million toe, the highest of all scenarios. The multipliers of scenario 2 do not lead to a higher acceptance of RFNBOs, as the price difference to biofuels is still significant in 2030. On the other hand, higher multipliers in 2030, as included in Scenario 3 and Scenario 4 (and in the sensitivity scenario), increase the relative share of RFNBOs in alternative maritime fuels (to 48-54 %), but their absolute amount increases only slightly compared to Scenario 2 (i.e. by about 35 ktoe or 10 %). The reason for this is that high multipliers reduce the required quantities of alternative maritime fuels (biofuels and RFNBOs) to reach the GHG intensity reduction target to about 0.8 million toe (compared to about 2 million toe in scenarios 1 and 2), as RFNBOs are more strongly considered in reaching the target. The contribution of alternative maritime fuels (bi-fuels and RFNBOs) is below 2 % in the scenarios with high multipliers in 2030. It should be noted that no overall system analysis was carried out as part of the modelling in order to estimate the distribution of the available, sustainable biomass across different sectors.

Figure 3: Biofuels and RFNBOs consumption and contribution in the fuel mix used in international maritime in 2030 across the scenarios



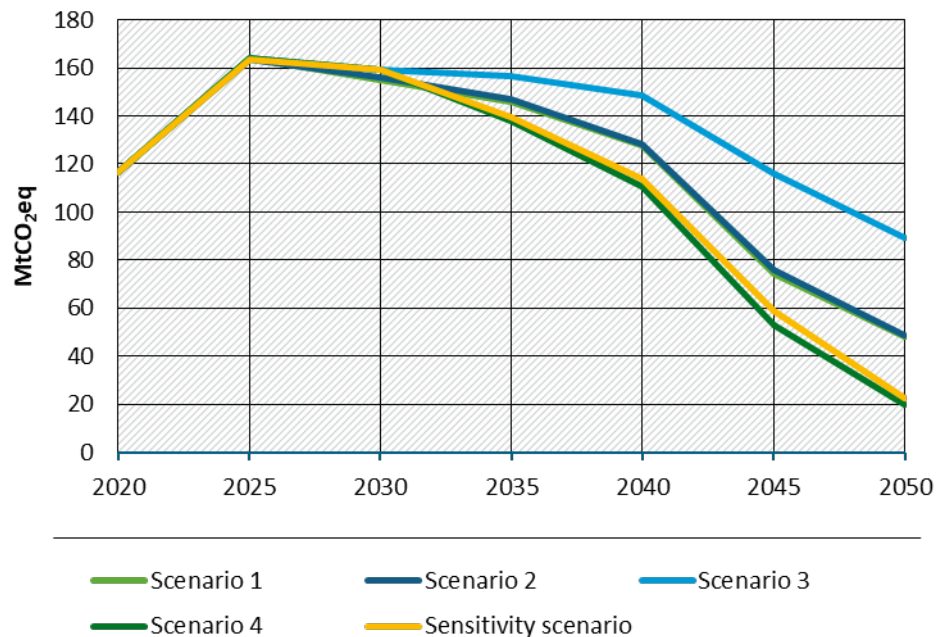


Source: own illustration, E3M

In 2050, significant differences in the consumption and share of alternative marine fuels (biofuels and RFNBOs) in total fuel consumption in international maritime transport can be observed between the scenarios. While biofuels dominate in Scenario 2, the share of RFNBOs is much higher in all other scenarios in 2050.

The development of GHG emissions from international maritime transport differs in the different scenarios (Figure 4). In particular, Scenario 4 (and the sensitivity scenario based on Scenario 4) reach the lowest emissions in 2050 (around 20 and 25 MtCO₂eq, respectively), due to the significant increase in the GHG intensity reduction target (i.e. 90 % compared to 75 % in all other scenarios). Scenario 1 and Scenario 2 reach similar emission levels in 2050 (around 48 MtCO₂eq), as they both achieve a GHG intensity reduction target of 75 % without the contribution of multipliers to this target. In contrast, Scenario 3 achieves the same target with multipliers, so that the emission level in 2050 is significantly higher (i.e. around 85 MtCO₂eq).

Figure 4: GHG emissions trajectory from international maritime in the period 2020 to 2050 on a WTW basis (including slippage)



Source: own illustration, E3M

Total costs (consisting of fuel costs, capital costs, operating costs and variable non-fuel costs) differ in the different scenarios mainly due to the share of fuel costs influenced by the fuel mix.

The modelled scenarios offer alternative ways to (over-)achieve the FuelEU Maritime Initiative targets by introducing sub-quotas and multipliers that promote RFNBOs while achieving the fuel mix GHG intensity reduction targets.

Sub-quotas are a strong signal to fuel suppliers, allowing for higher penetration of RFNBOs in international maritime transport and lower demand for other alternative maritime fuel options like biofuels (Scenario 1, Scenario 4 long-term). The exclusive consideration of multipliers in the promotion of RFNBOs may lead to higher emissions, as the actual improvement in the GHG intensity of the fuel mix is lower than in other scenarios. Furthermore, the use of multipliers will lead to a higher share of fossil fuels, which will nevertheless become more expensive due to rising CO₂ prices (Scenario 3). The combination of multipliers in the short term and sub-quotas for RFNBOs in the longer term with more ambitious GHG intensity reduction targets for the international maritime fuel mix results in the lowest emissions and higher market penetration of RFNBOs compared to other scenarios, but at higher fuel costs (Scenario 4).

In-depth studies on climate-neutral fuels

Unlike in aviation transport, various sustainable energy supply options compete in maritime transport. As a consequence, none of the options can be clearly favoured at present. The different fuel options discussed in the sector all have specific challenges, advantages and trade-offs. To complement the modelling and to provide background knowledge for the monitoring of the fuel-related legislative projects, the following aspects are highlighted in separate in-depth studies based on an extensive literature review and interviews with experts:

- The properties, production processes, production costs and onshore infrastructure of future fuels;

- ▶ The technical aspects on board, including storage, safety, compatibility of internal combustion engines and fuel cells with the fuels, emissions and shipboard costs;
- ▶ The life cycle emissions of future fuels.

The in-depth studies were published as separate publications and are summarised in this report.⁴ The following fuel options are included in the in-depth studies: RFNBOs and second generation biofuels or advanced biofuels. For each in-depth study, an extensive literature review and interviews with experts from industry, research and environmental organisations were conducted.

In general, the fuels that are least similar to today's fossil marine fuels pose the greatest challenges. While diesel-like synthetic fuels and biofuels can be treated in many ways like today's fossil fuels, biofuels and e-diesel are expected to be the most expensive and (especially bio-diesel) the least available fuel option by 2050. Sustainable biofuels⁵ make no significant contribution to the decarbonisation of the global sector in the long term due to limited availability and uncertain greenhouse gas accounting. In the short term, however, biofuels can already contribute to reducing emissions, as they are more readily available than RFNBOs.

Taking into account both shore-side and ship-side aspects, e-methanol and e-ammonia appear to be the fuels with the best prospects of gaining significant market shares in the fuel market for international maritime transport. While more favourable production costs are expected for ammonia than for methanol, the use of ammonia is still unclear or problematic in some cases (safe handling on board and in port, toxicity, availability of engines and TTW emissions).

In order for future fuels to contribute to the decarbonisation of maritime transport, it must be ensured along the entire life cycle that no greenhouse gas emissions are generated. Particularly important here are the (additional) provision of renewable electricity/energy and a sustainable CO₂ source. Fugitive emissions due to leakage and slippage are a risk especially for gaseous fuels. In addition, due to the foreseeable limited capacity of renewable electricity, the cumulative energy input of the different production paths has to be considered. Clear specifications for the determination of life-cycle emissions and robust certification systems are necessary to address the aforementioned aspects.

In the discourse with experts, it becomes clear where there is uncertainty and a need for research (TTW emissions, future availability and fuel costs) on the one hand, and that clear political guidelines and measures are desired in order to be able to make long-term investments on the other. In addition, the literature review also shows that policy instruments need to be designed in such a way that the different market segments and ship types in maritime transport can choose the best climate-neutral energy supply options for themselves. The best fuel option for an ocean-going container ship is not necessarily the best option for a coastal ferry.

Conclusion

The highest emission reductions and higher market penetration of RFNBOs can be achieved based on the modelling by combining multipliers in the short term and sub-quotas for RFNBOs in the longer term with more ambitious GHG intensity reduction targets for the international maritime fuel mix. The final agreement of the triologue at least partially reflects the derived

⁴ 1. In-depth study – Future Fuels: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/in-depth-analysis-1-future-fuels>

2. In-depth study – Technical aspects of future fuels in existing fleet and newbuilds: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/in-depth-analysis-2-technical-aspects-of-future>

3. In-depth study – Lifecycle emissions of future fuels: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/in-depth-analysis-3-lifecycle-emissions-of-future>.

⁵ Based on RED criteria

recommendation of the modelling. The trialogue outcome includes more ambitious targets for greenhouse gas intensity reduction, a short-term RFNBO multiplier until 2033 and a conditional sub-quota for RFNBOs in the mid-2030s. Based on the modelling, it can be argued that an introduction of a sub-quota can ensure better market penetration of RFNBOs through increased legal and quantity certainty for investments. Future planned revisions of the regulation could take this into account.

The in-depth studies looked at various aspects of future alternative fuels for maritime transport. The advantages and disadvantages of the selected sustainable biofuels and RFNBOs were explained and what this means for instrument design. Based on the consideration of land-based and ship-based aspects, e-methanol and e-ammonia appear to be the fuels with the greatest chance of gaining substantial market share in the fuel market for international maritime transport. Sustainable biofuels cannot make a major contribution to the decarbonisation of the sector in the long term due to limited availability and the uncertain accounting of GHG emissions. The final version of the FuelEU Maritime Regulation addresses these advantages and disadvantages of different fuels by being technology neutral by setting a greenhouse gas intensity threshold.

Clear targets for the determination of life-cycle emissions and robust certification schemes are necessary to actually achieve the corresponding greenhouse gas reduction of the fuels. Particularly important for the life-cycle emissions of RFNBOs is the (additional) provision of renewable electricity/energy and a sustainable CO₂ source. The EU's new legislative plans are a step in the right direction, as renewable fuels will have to meet certain standards through the RED.⁶ The FuelEU Maritime Regulation considers through its well-to-wale approach also fugitive emissions due to leakage and allows for the use of various technologies/fuels. Although the FuelEU Maritime Regulation takes into account the fact that it is still unclear which fuel will dominate the sector, its level of ambition allows fossil fuels (especially LNG with the corresponding risk of methane slip and possible "lock-in" effect) to be used for too long.

There are many factors that should be taken into account when considering the suitability of a fuel for ocean shipping. These include cost, manageability/compatibility, risk, greenhouse gas mitigation, availability. The in-depth studies show that policy instruments need to be designed in such a way that the different market segments and ship types in maritime transport can choose the best climate-neutral energy supply options for themselves. The design of the maritime EU ETS and the FuelEU Maritime Regulation make this possible. However, the incentives for RFNBOs, which are advantageous in many respects, can be expanded. The focus on land-based infrastructure and production of alternative fuels for maritime transport that emerged from the in-depth studies could also be further strengthened through EU regulation. The Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR), for example, does not specify RFNBOs or sustainable biofuels for maritime transport, and the FuelEU Maritime Regulation lacks an incentive similar to the one in ReFuelEU Aviation that makes fuel suppliers responsible or at least provides certainty (such as a clear, longer-term quota).

Overall, the research project has thus, on the one hand, concretely accompanied the political process on the fuel-related legislative projects and, on the other hand, highlighted important findings and aspects for future improvements with regard to alternative fuels for maritime transport.

⁶ Low-carbon fuels must also comply with the relevant provisions of a Union legal act on internal markets for renewable gases and natural gas and for hydrogen and be subject to certification.

1 Einleitung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Verhandlungen zu den drei kraftstoffbezogenen Legislativvorhaben zu begleiten (FuelEU Maritime (EC 2021c), ReFuelEU Aviation (EC 2021b) und Renewable Energy Directive (RED) (EC 2021a)). Die drei Initiativen sind im Rahmen des European Green Deal (EC 2019) und des Klimazielplans (EC 2020a) für die langfristige Klimapolitik und Klimaziele der Europäischen Union (EU) zu betrachten. Zudem spielt die von der Europäischen Kommission (EC) im Jahr 2020 veröffentlichte Mobilitätsstrategie („Sustainable and Smart Mobility Strategy“, EC (2020b)) eine Rolle. Diese Strategie enthält einen Aktionsplan mit über 80 Initiativen, die bis 2024 umgesetzt werden sollen. Für die Energie- bzw. Kraftstoffversorgung des Verkehrs sind insbesondere die drei zu Anfang genannten Initiativen relevant. Zur Umsetzung des European Green Deal hat die Europäische Kommission am 14. Juli 2021 eine Reihe von Legislativvorschlägen im Rahmen des „Fit for 55“-Pakets⁷ veröffentlicht, welches die Entwürfe FuelEU Maritime und ReFuelEU Aviation enthält. Das Forschungsvorhaben hat das Trilogverfahren des Europäischen Parlaments und des Europäischen Rates begleitet.

Der Luft- und Seeverkehr tragen zusammen 5-6 % zu den globalen CO₂-Emissionen bei. Vor der Covid-19 Pandemie stiegen die Emissionen in beiden Sektoren. Zur Minderung der Emissionen in beiden Sektoren stehen verschiedene Optionen zur Verfügung. Neben der Reduktion der Nachfrage und Effizienzverbesserungen stellt die Nutzung alternativer (klimaneutraler) Kraftstoffe den größten Hebel dar. Nachhaltige, alternative Kraftstoffe finden in beiden Sektoren jedoch kaum Verwendung. Bisher sind die Klimawirkungen des Luft- und Seeverkehr nämlich kaum reguliert. Während auf internationaler Ebene die Verhandlungen zu globalen Maßnahmen andauern, geht die EU nun mit den oben genannten Initiativen voran.

Das Forschungsvorhaben besteht aus drei Arbeitspaketen:

1. Begleitung europäische und nationale Gesetzgebungsverfahren,
2. Forschungsfragen in Form von Vertiefungsstudien inklusive Interviews mit Experten und Expertinnen und Modellierung,
3. Ad-hoc Beratung.

Das Forschungsvorhaben wurde im November 2023 abgeschlossen. Die angefallenen Arbeiten sind in den folgenden Kapiteln zusammengefasst. Es wurden umfangreich verschiedene Ausgestaltungen der FuelEU Maritime Initiative modelliert (Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Es wurden drei Vertiefungsstudien auf Basis von Interviews mit Experten und Expertinnen und Literaturrecherchen erstellt (Kapitel 3). Zur Begleitung der kraftstoffbezogenen Gesetzgebungsverfahren gab es zudem verschiedene ad-hoc Beratungsleistungen.

⁷ Delivering the European Green Deal: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en.

2 Quantifizierung verschiedener Szenario-Annahmen zum FuelEU Maritime Legislativvorschlag

2.1 Einleitung

Im Rahmen der Trilog-Diskussionen zur Initiative "FuelEU Maritime - Green European Maritime Space" (im Folgenden FuelEU Maritime genannt) unterstützt E3-Modelling das Umweltbundesamt (UBA) mit Szenario-Projektionen unter Verwendung des PRIMES-Maritime-Modells⁸.

Im Rahmen des Vorschlags für das Fit-For-55-Pakets zielt die Initiative FuelEU Maritime darauf ab, die Emissionen des internationalen Seeverkehrs zu reduzieren, um einen Beitrag zu den Gesamtanstrengungen zur Verringerung der Treibhausgas (THG) -emissionen zu leisten: Ziel ist es, die Verwendung alternativer Schiffskraftstoffe⁹ im Laufe der Zeit zu erhöhen. Der Kommissionsvorschlag für FuelEU Maritime sieht insbesondere vor, die Treibhausgasintensität der im internationalen Seeverkehr verwendeten Kraftstoffe (einschließlich Elektrizität) im Laufe der Zeit gegenüber der Treibhausgasintensität der im Jahr 2020 verwendeten Kraftstoffe zu verringern (Tabelle 1). Die Anforderung gilt für den Energieverbrauch am Liegeplatz, den Energieverbrauch bei allen Fahrten innerhalb der EU und für 50 % des Energieverbrauchs bei Fahrten zwischen einem EU-Hafen und Drittstaaten. Im EC-Vorschlag (EC 2021c) wird der Beitrag verschiedener alternativer Schiffskraftstoffe (z. B. Biokraftstoffe, E-Fuels) nicht auf der Grundlage verbindlicher Regelungen (z. B. Unterkontingente) oder sonstiger Regelungen festgelegt, sondern es wird ein zielbasierter Ansatz verfolgt, bei dem die Betreiber Kraftstoffe und Technologien frei wählen können, um die Ziele zu erreichen.

Tabelle 1: Ziele für die Treibhausgasintensität des im internationalen Seeverkehr verwendeten Kraftstoffmixes im Rahmen des Legislativvorschlags „FuelEU Maritime“ im Zusammenhang mit dem Maßnahmenpaket „Fit For 55“

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Treibhausgasintensität des Kraftstoffmixes ^a	- 2 %	- 6 %	- 13 %	- 26 %	- 59 %	- 75 %

Quelle: EC (2021c). Finale Trilog-Einigung nicht berücksichtigt.

Anmerkung: ^a Relativ zu 2020

Das UBA hat in Zusammenarbeit mit dem Konsortium alternative Szenario-Annahmen definiert, die sich vom FuelEU Maritime Vorschlag dadurch unterscheiden, dass sie Unterquoten und/oder Multiplikatoren für bestimmte alternative maritime Kraftstoffe vorsehen, und/oder das Ambitionslevel der Treibhausgasintensitätsreduktion bis zum Jahr 2050 erhöhen. Es wurden insgesamt vier Szenarien und ein zusätzliches Preissensitivitätsszenario quantifiziert. Diese Szenarien wurden mithilfe des PRIMES-Maritime-Modells quantifiziert, das Projektionen für den Kraftstoffverbrauch nach Kraftstoffart, THG-Emissionen (über die gesamte Kette, d. h. Well-to-Tank (WTT), Tank-to-Wake (TTW), Well-to-Wake (WTW)) und Gesamtkosten liefert.

Nach dieser Einleitung liefert dieses Kapitel den Hintergrund für die damit verbundenen Modellierungsannahmen (Abschnitt 2.2), beschreibt die Szenarien (Abschnitt 2.3) und erörtert die wichtigsten Ergebnisse der Szenarien (Abschnitt 2.4).

⁸ Eine kurze Beschreibung des Modells findet sich im Anhang. Die ausführliche Modellbeschreibung ist online zu finden unter: <http://www.e3mlab.eu/e3mlab/PRIMES%20Manual/The%20PRIMES%20MODEL%202018.pdf>

⁹ Alternative Schiffskraftstoffe umfassen in diesem Kapitel: erneuerbare Kraftstoffe von biologischen und nicht-biologischen Ursprungs (Biokraftstoffe und RFNBOs) und die Nutzung von Elektrizität, siehe Abschnitt 2.2.2

2.2 Annahmen zur Modellierung

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Annahmen zur Modellierung vorgestellt. Diese beziehen sich auf den allgemeinen politischen Kontext, Kraftstoffarten und -preise, Emissionsfaktoren, die Verfügbarkeit von Biokraftstoffen und die Modellierung von Multiplikatoren.

2.2.1 Politischer Kontext

Die Modellierung findet vor dem Hintergrund der Klimaneutralität statt, wie sie im Europäischen Green Deal und im Klimagesetz beschrieben wird, das das Klimaziel für das Jahr 2030 von mindestens 55 % Reduktion der Netto-THG-Emissionen im Vergleich zum Jahr 1990 und das rechtliche Ziel für die EU, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen, beinhaltet (EC 2020a).

In diesem Zusammenhang wird das bestehende EU-Emissionshandelssystem (EU-ETS) auf den Seeverkehr erweitert. Die e EU-Verordnung über die Überwachung, Berichterstattung und Überprüfung (MRV) deckt bereits den nationalen und internationalen Seeverkehr ab. Der Geltungsbereich der Initiative FuelEU Maritime umfasst auch den nationalen und (Teiles des) internationalen Seeverkehr (s). Der in der vorliegenden Analyse berücksichtigte Preispfad des EU-ETS entspricht dem Pfad in der veröffentlichten EU-ETS-Folgenabschätzung (Tabelle 2). Für den Zeitraum nach 2030 zeigen die EU-ETS-Preisprognosen einen Anstieg über 100 €/tCO₂ bis auf 400 €/tCO₂. Allerdings spiegeln die Preisprognosen nur bis 2040 die Marktbedingungen wider (bis zu 150 €/tCO₂). Jenseits dieser Daten sind die Emissionen sehr gering, und der Kohlenstoffpreis entspricht in Wirklichkeit den Grenzkosten der Kohlenstoffvermeidung und ist nicht das Ergebnis eines Marktes für Zertifikate.

Tabelle 2: Entwicklung der Preise im EU-ETS

€ pro tCO ₂	2025	2030	2035	2040	2045	2050
EU-ETS-Preis	35	53	110	203	297	390

Anmerkung: für die Zeit nach 2030 spiegelt der CO₂-Preis nicht unbedingt einen Marktmechanismus wider, sondern ist eher an die Logik der Grenzvermeidungskostenkurven angelehnt

2.2.2 Kraftstoffarten und Kraftstoffpreise

Die Modellierung umfasst eine breite Palette von Schiffskraftstoffen, nämlich:

Fossile Kraftstoffe

- ▶ Fossile flüssige Kraftstoffe (z. B. Diesel, Schweröl)
- ▶ Verflüssigtes Erdgas (LNG)

Alternative Kraftstoffe für den Seeverkehr

- ▶ Erneuerbare Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs (Renewable Fuels of Non-Biological Origin, RFNBOs), zu denen synthetische flüssige Schiffskraftstoffe (E-Liquids) wie E-Diesel und synthetische gasförmige Schiffskraftstoffe (E-Gas, P2X-Gas oder Reingas) gehören, die aus grünem Wasserstoff hergestellt werden¹⁰,
- ▶ Biokraftstoffe, die flüssige Biokraftstoffe (z. B. Biodiesel, Bio-Schweröl) und Biomethan umfassen, die aus Rohstoffen hergestellt werden, die in Anhang IX der Erneuerbaren-Energien-

¹⁰ D.h. Wasserstoff, der aus erneuerbarem Strom erzeugt wird. Ammoniak und Methanol sind im synthetischen Flüssigbrennstoffmisch (E-Liquids) enthalten und werden in der Modellierung nicht explizit dargestellt.

Richtlinie (RED) (2018/2001) aufgeführt sind (d. h. fortschrittliche Biokraftstoffe oder Biokraftstoffe des Teils A und des Teils B des Anhangs IX),

- ▶ grüner Wasserstoff,¹¹
- ▶ Elektrizität.

Kraftstoffpreise

Die Preisentwicklung der verschiedenen in die Modellierung einbezogenen Kraftstoffe ist in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 3: In der Modellierung verwendete zentrale Kraftstoffpreise in €/toe

Kraftstofftyp	2030	2050
Fossile flüssige Kraftstoffe	589	775
LNG	607	715
E-Liquids	2.057	1.548
E-Gas	2.023	1.188
Biokraftstoffe	1.312	1.250
Biomethan	871	978
Elektrizität ^a	1.772	1.628

Anmerkung: ^a Verbraucherpreis (nicht der von den E-Kraftstoff-Herstellern gezahlte Preis)

2.2.3 Emissionsfaktoren

Die FuelEU Maritime Initiative verfolgt bei der Emissionsbilanzierung einen Lebenszyklusansatz, bei dem die Emissionen von der Kraftstoffherstellung (WTT) bis zu ihrer Verbrennung (TTW) erfasst werden. Die WTT- und TTW-Emissionen ergeben zusammen die Well-To-Wake-Emissionen (WTW), auf denen die Ziele der Treibhausgasemissionsintensität basieren.

Die WTT-Emissionsfaktoren von Diesel, Heizöl und LNG beruhen auf Lindstad (2019). Wasserstoff wird aus erneuerbarem Strom hergestellt, weshalb der Emissionsfaktor für statistische und Modellierungszwecke mit 0 angesetzt wird. Es wird angenommen, dass der Kohlenstoff in synthetischen Kraftstoffen (d. h. E-Fuels, E-Gas) durch direkte Luftabscheidung (Direct Air Capture, DAC) aus der Atmosphäre gewonnen wird, weshalb der Emissionsfaktor ebenfalls mit 0 angesetzt wird. Die Emissionen von Biokraftstoffen und Biomethan stehen im Zusammenhang mit der Produktion der Ausgangsstoffe. Sie werden vom PRIMES Biomasse-Versorgungsmodell¹² abgeleitet und umfassen Emissionen aus der Rohstoffproduktion und dem Transport. Emissionen aus Landnutzungsänderungen, ob direkt oder indirekt, sind nicht enthalten. Der Emissionsfaktor der Stromerzeugung ist länderabhängig. Die für die Modellierung verwendeten WTW-Emissionsfaktoren sind in Tabelle 4 dargestellt. Der WTW-Emissionsfaktor für den Kraftstoffstoffmix im Jahr 2020 liegt bei 90,95 gCO₂eq/MJ.

¹¹ D.h. Wasserstoff, der aus erneuerbarem Strom erzeugt wird. Ammoniak und Methanol sind im synthetischen Flüssigbrennstoffmix (E-Liquids) enthalten und werden in der Modellierung nicht explizit dargestellt.

¹² siehe z.B. <https://e3modelling.com/modelling-tools/primes-biomass/>

Tabelle 4: Für die Modellierung verwendete WTW-Emissionsfaktoren (ohne Schlupf)^a

Kraftstofftyp	WTW-Emissionsfaktor (tCO ₂ eq/toe)
Diesel	3,7
Heizöl	3,8
LNG	3,1
E-Flüssigkeiten	0
E-Gas	0
Sauberes Gas	0
Biokraftstoffe	0,4-1 ^b
Biomethan	0,4
Wasserstoff	0
Elektrizität	siehe Fußnote c

Anmerkungen: ^a Die Modellierung umfasst zusätzliche Emissionsfaktoren für den Schlupf von Methan (zwischen 0,3-4 gCO₂eq/kWh) und Stickoxiden (0,01-0,03 gCO₂eq/kWh) je nach Motortyp; ^b Je nach Art des Biokraftstoffs; ^c länderabhängig

2.2.4 Verfügbarkeit von Biokraftstoffen

Die Projektionen des PRIMES-Biomasseversorgungsmodells zeigen, dass in der EU ausreichend Biomasse für die Herstellung von Biokraftstoffen und Biomethan für den maritimen Sektor (der EU= zur Verfügung steht. Insgesamt ist die Biomasseverfügbarkeit begrenzt (Material Economics 2021). Die Biokraftstoffproduktion sollte aus der Perspektive des ganzen Energiesystems und nicht ausschließlich aus der Perspektive des maritimen Sektors betrachtet werden. Im Rahmen der Modellierung wurde allerdings keine Gesamtsystemanalyse durchgeführt, um die Aufteilung der vorhandenen, nachhaltigen Biomasse, auf verschiedene Sektoren abzuschätzen. Zu Beginn des Zeithorizonts basiert die Produktion von flüssigen Biokraftstoffen auf Abfallfetten. Auf dem Weg zum Jahr 2050 werden flüssige Biokraftstoffe in zunehmenden Mengen aus den in Anhang IX Teil A der RED (2018/2001) aufgeführten Rohstoffen hergestellt.

2.2.5 Modellierung von Multiplikatoren

Die Berechnung des Treibhausgasintensitätsindex basiert auf Gleichung (1) (Anhang A), die im Vorschlag zur FuelEU Maritime Initiative dargestellt ist (EC 2021c). In Szenarien, die Multiplikatoren für RFNBOs enthalten, wird deren Masse im Nenner mit einem Faktor multipliziert, der im Szenario angegeben ist (siehe Gleichung (2) im Anhang A). Somit wird der Verbrauch von RFNBOs belohnt und das Treibhausgasintensitätsziel kann mit geringeren Mengen von Kraftstoffen erreicht werden.

In der Modellierung wird der projizierte Kraftstoffmix der neuen Technologien auf der Grundlage diskreter Auswahlfunktionen (discrete choice functions) bestimmt. Der projizierte Kraftstoffmix wird daher durch den relativen Kraftstoffpreisunterschied der verschiedenen Alternativen (z. B. RFNBOs, Biokraftstoffe) in jedem Zeitraum beeinflusst. Um die Wirkung der Multiplikatoren zu erfassen, werden in die Modellierung die in jedem Szenario angegebenen Multiplikatoren als Faktoren einbezogen, die die relative Wettbewerbsfähigkeit von RFNBOs gegenüber anderen alternative Schiffskraftstoffen (Biokraftstoffe) auf Preisbasis im Vergleich zu Szenarien ohne Multiplikatoren erhöhen.

2.3 Definition der Szenarien

In diesem Abschnitt werden die Szenarien beschrieben, wie sie vom UBA in Zusammenarbeit mit dem Konsortium definiert und in PRIMES-Maritime umgesetzt wurden. Eine Übersicht über die Szenarien findet sich in Tabelle 5.

Tabelle 5: Überblick über die modellierten Szenarien

Szenario	Beschreibung
Szenario 1	RFNBO-Unterquote
Szenario 2	Kurzfristig niedrige RFNBO-Multiplikatoren
Szenario 3	Hohe RFNBO-Multiplikatoren, sowohl kurz- als auch langfristig
Szenario 4	Kurzfristig hohe RFNBO-Multiplikatoren, langfristig RFNBO-Unterquoten, ergänzt durch ehrgeizigere Treibhausgasintensitätsziele
Sensitivitätsszenario	Kurzfristig hohe RFNBO-Multiplikatoren, langfristig RFNBO-Unterquoten, ergänzt durch ehrgeizigere Treibhausgasintensitätsziele, niedrigere RFNBO-Preise und höhere Biokraftstoffpreise

2.3.1 Szenario 1: RFNBO-Unterquote

In diesem Szenario wird der Anteil erneuerbarer Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs (RFNBOs) am Kraftstoffmix im internationalen Seeverkehr auf der Grundlage einer Unterquote bestimmt, die im Laufe der Zeit von 2 % im Jahr 2030 auf 63 % im Jahr 2050 ansteigt¹³ (Tabelle 6), unter Beibehaltung der Gesamtziele für die Treibhausgasintensität von FueIEU Maritime (Tabelle 1).

Tabelle 6: Entwicklung der Unterquoten für RFNBOs im internationalen Seeverkehr in Szenario 1

	2030	2035	2040	2045	2050
RFNBO-Unterquote	2 %	5 %	12 %	45 %	63 %

2.3.2 Szenario 2: Kurzfristig niedrige RFNBO-Multiplikatoren

In Szenario 2 wird der Beitrag von RFNBOs im Kraftstoffstoffmix durch die Verwendung von Multiplikatoren in den Jahren 2030 bis 2035 gefördert (siehe Beschreibung in Abschnitt 2.2), wobei die THG-Intensitätsziele von FueIEU Maritime beibehalten werden (Tabelle 1).

Für RFNBOs gelten die folgenden Multiplikatoren:

¹³ Der ursprüngliche vom UBA vorgeschlagene Kurs sah einen höheren Beitrag von RFNBOs in den Jahren 2045 und 2050 vor, und zwar um 29 % bzw. 70 %, während das Ziel der Treibhausgasintensität von 59 % bzw. 70 % beibehalten wurde. Erste Modellläufe zeigten, dass ein solcher Verlauf zu einem steilen Anstieg der Biokraftstoffnachfrage bis 2045 und einem anschließenden Einbruch führen würde. Der Grund dafür ist, dass der Anstieg des THG-Intensitätsziels und der RFNBO-Unterquote asymmetrisch ist. In den Gesprächen mit dem UBA wurde argumentiert, dass eine solche Störung aus marktwirtschaftlicher Sicht nicht machbar ist, da die Biokraftstoffproduktionsmenge im Jahr 2045 erhebliche Investitionen in die Produktionskapazitäten und Anpassungen der Lieferketten (z.B. Produktion, Vertrieb, Lagerung) erfordern würde, die in der Zeit danach verloren gehen würden. Es ist zweifelhaft, ob Investoren bei einer solchen Vorausschau in diese Richtung gehen würden. Aufgrund dieser Erkenntnis und in Absprache mit dem UBA wurde der Verlauf der Unterquote für RFNBOs in den Jahren 2045 und 2050 leicht geändert.

- ▶ 2 bis zum 1. Januar 2030,
- ▶ 1,5 bis zum 1. Januar 2035,
- ▶ kein Multiplikator nach dem 1. Januar 2035.

2.3.3 Szenario 3: Kurz- und langfristig hohe RFNBO-Multiplikatoren

In diesem Szenario wird der Beitrag von RFNBOs im Kraftstoffstoffmix durch die Verwendung von Multiplikatoren über den gesamten Zeitraum bis zum Jahr 2050 gefördert (siehe Beschreibung in Abschnitt 2.2). Die Ziele für die Treibhausgasintensität sind identisch mit denen von FuelEU Maritime (Tabelle 1), wobei der Beitrag von RFNBOs auf das Ziel angerechnet wird, wie in Gleichung (2) der Initiative beschrieben (Anhang A).

Für RFNBOs gelten die folgenden Multiplikatoren:

- ▶ 5 bis zum 1. Januar 2030,
- ▶ 4 bis zum 1. Januar 2035,
- ▶ 3 nach dem 1. Januar 2035.

2.3.4 Szenario 4: Kurzfristig hohe RFNBO-Multiplikatoren, langfristig RFNBO-Unterquote, ergänzt durch ehrgeizigere Treibhausgasintensitätsziele

In Szenario 4 wird der Beitrag von RFNBOs zum Kraftstoffmix durch die Verwendung von Multiplikatoren in den Jahren 2030 bis 2035 gefördert, wobei die gleichen Multiplikatoren wie in Szenario 3 verwendet werden. Nach 2035 wird das Multiplikatorensystem durch eine Unterquote für den Beitrag von RFNBOs zum Kraftstoffmix im internationalen Seeverkehr ersetzt (Tabelle 7). Parallel dazu steigt das Ambitionslevel der Reduzierung der Treibhausgasintensität (Tabelle 8) im Vergleich zu dem ursprünglichen Vorschlag der Europäischen Kommission für FuelEU Maritime (Tabelle 1).

Die folgenden Multiplikatoren gelten für RFNBOs in Szenario 4:

- ▶ 5 bis zum 1. Januar 2030,
- ▶ 4 bis zum 1. Januar 2035,
- ▶ kein Multiplikator nach dem 1. Januar 2035.

Tabelle 7: RFNBO-Unterquote in Szenario 4

	2030	2035	2040	2045	2050
RFNBO-quote	-	5 %	12 %	45 %	63 %

Tabelle 8: Ziele für die Treibhausgasintensitätsminderung des im internationalen Seeverkehr verwendeten Kraftstoffmixes in Szenario 4

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Treibhausgasintensität des Kraftstoffmixes ^a	-2 %	-6 %	-18 %	-35 %	-70 %	-90 %

Anmerkung: ^abezogen auf 2020 (d.h. ca. 3,75 tCO₂/toe)

2.3.5 Sensitivität zu Szenario 4: Kurzfristig hohe RFNBO-Multiplikatoren, langfristig RFNBO-Unterquote, ergänzt durch ehrgeizigere THG-Intensitätsminderungsziele, niedrigere RFNBO-Preise und höhere Biokraftstoffpreise

Bei diesem Szenario handelt es sich um ein Sensitivitätsszenario in Bezug auf die Preisannahmen für RFNBOs und Biokraftstoffe, die im internationalen Seeverkehr verwendet werden. Im Vergleich zu den Preisen in Tabelle 3 wird der Preis von RFNBOs im Zeitraum von 2030 bis 2050 um 33 % gesenkt und der Preis von Biokraftstoffen steigt im gleichen Zeitraum je nach Art des Biokraftstoffs (d. h. flüssig oder gasförmig) um 20 - 40 % (Tabelle 9). Diese Sensitivitätsanalyse soll Szenarien widerspiegeln, in denen die Produktionskosten von RFNBOs aufgrund ihres beschleunigten Einsatzes schneller sinken, während die Preise für Biokraftstoffe aufgrund von Verfügbarkeitsbeschränkungen, z. B. in Bezug auf Anbauflächen, steigen. Der Preis für fossile Kraftstoffe bleibt unverändert. Wie bei allen Szenario-Annahmen wurden diese exogenen Preisannahmen zwischen dem Forschungsteam und dem Auftraggebenden vereinbart. Sie beruhen auf der Annahme, dass der Preis für Biokraftstoffe aufgrund der längerfristigen Begrenzung des Biokraftstoffangebots steigen wird und dass der Preis für RFNBOs aufgrund einer Ausweitung ihrer Produktion sinken wird¹⁴.

Tabelle 9: Relativer Preisunterschied der alternativen Schiffskraftstoffe im Jahr 2030 und 2050 im Sensitivitätsszenario im Vergleich zu den zentralen Preisannahmen (Preisniveaus in Klammern)

	2030	2050
E-Liquids	-33 % (1.371 €/toe)	-33 % (1.032 €/toe)
E-Gas	-33 % (1.349 €/toe)	-33 % (792 €/toe)
Biokraftstoffe	-	25 % (1.563 €/toe)
Biomethan	20 % (1.045 €/toe)	40 % (1.369 €/toe)

2.4 Ergebnisse des Szenarios

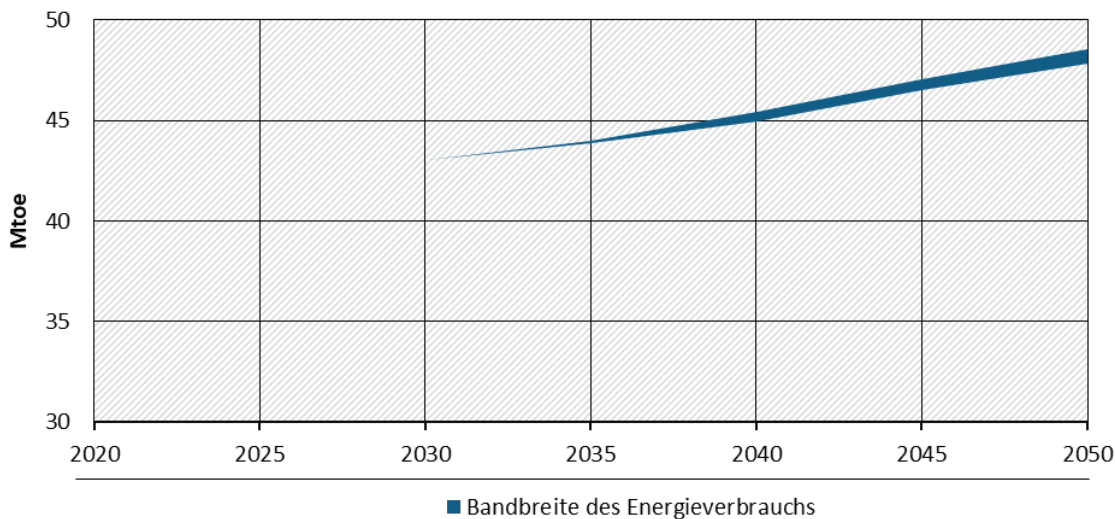
In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse der Szenarien in Bezug auf Energieverbrauch, THG-emissionen und Kosten im internationalen Seeverkehr der EU vorgestellt.

2.4.1 Energieeinsatz

Die Projektionen zeigen, dass sich der Energieverbrauch in den verschiedenen Szenarien nicht wesentlich unterscheidet (Abbildung 5). Der Gesamtkraftstoffverbrauch im internationalen Seeverkehr ist bis zum Jahr 2030 bei allen Szenarien ähnlich, danach ist ein geringer Unterschied zu beobachten (weniger als 1 %, der sich jedoch auf die Gesamtkraftstoffkosten auswirkt). Dieses Ergebnis zeigt, dass sich die Szenarien eher auf den Kraftstoffmix auswirken, als dass sie strukturelle Veränderungen in der Flotte bewirken (z.B. Verschiebung von Frachttransport hin zu anderen Schiffsgrößen und -technologien).

¹⁴ Es ist darauf hinzuweisen, dass die in diesem Sensitivitätsszenario verwendeten Preisannahmen nicht aus einer vollständigen Energiesystemanalyse abgeleitet wurden (wie dies bei den vorherigen Preisen der Fall ist).

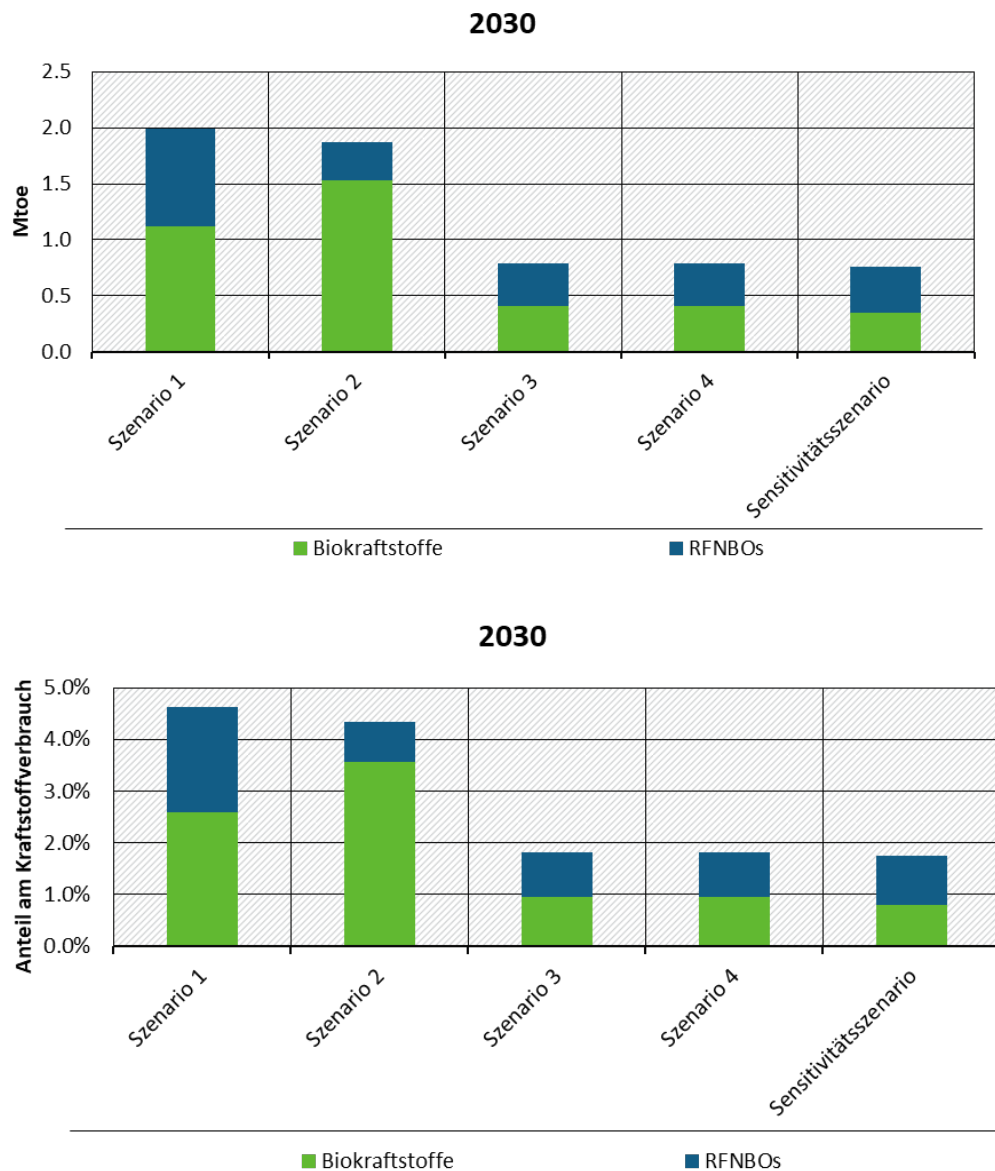
Abbildung 5: Bandbreite des Energieverbrauchs im internationalen Seeverkehr in den Szenarien für den Zeitraum 2020 und 2050



Quelle: eigene Darstellung, E3M

Abbildung 6 zeigt den Verbrauch von Biokraftstoffen und RFNBOs und ihren Anteil am Gesamtkraftstoffverbrauch im Jahr 2030 in den verschiedenen Szenarien. Der Verbrauch von Biokraftstoffen und RFNBOs erreicht etwa 2 Mio. toe in Szenario 1 und 1,9 Mio. toe in Szenario 2 (oder etwa 4,6 % bzw. 4,3 % des gesamten Kraftstoffverbrauchs), um das Ziel der Treibhausgasintensität im Jahr 2030 zu erreichen. Die Szenarien unterscheiden sich darin, dass Szenario 1 eine Quote für den Verbrauch von RFNBOs (2 % im Jahr 2030) vorsieht, was zu etwa 0,9 Mio. toe führt, dem höchsten Wert aller Szenarien. Die Multiplikatoren von Szenario 2 führen nicht zu einer höheren Akzeptanz von RFNBOs, da der Preisunterschied zu Biokraftstoffen im Jahr 2030 immer noch erheblich ist. Andererseits erhöhen höhere Multiplikatoren im Jahr 2030, wie sie in Szenario 3 und Szenario 4 (und im Sensitivitätsszenario) enthalten sind, den relativen Anteil von RFNBOs an den alternativen maritimen Kraftstoffen (auf 48 - 54 %), aber ihre absolute Menge steigt nur geringfügig im Vergleich zu Szenario 2 (d.h. um etwa 35 ktoe oder 10 %). Der Grund dafür ist, dass hohe Multiplikatoren die erforderlichen Mengen alternativer maritimer Kraftstoffe (Biokraftstoffe und RFNBOs) zur Erreichung des THG-Intensitätsminderungsziels auf etwa 0,8 Mio. toe (im Vergleich zu etwa 2 Mio. toe in Szenario 1 und 2) reduzieren, da RFNBOs bei der Erreichung des Ziels stärker berücksichtigt werden. Der Beitrag alternativer maritimer Kraftstoffe (Bio-kraftstoffe und RFNBOs) liegt bei den Szenarien mit hohen Multiplikatoren im Jahr 2030 unter 2 %.

Abbildung 6: Verbrauch von Biokraftstoffen und RFNBOs und Anteil am Kraftstoffmix im internationalen Seeverkehr im Jahr 2030 in den verschiedenen Szenarien

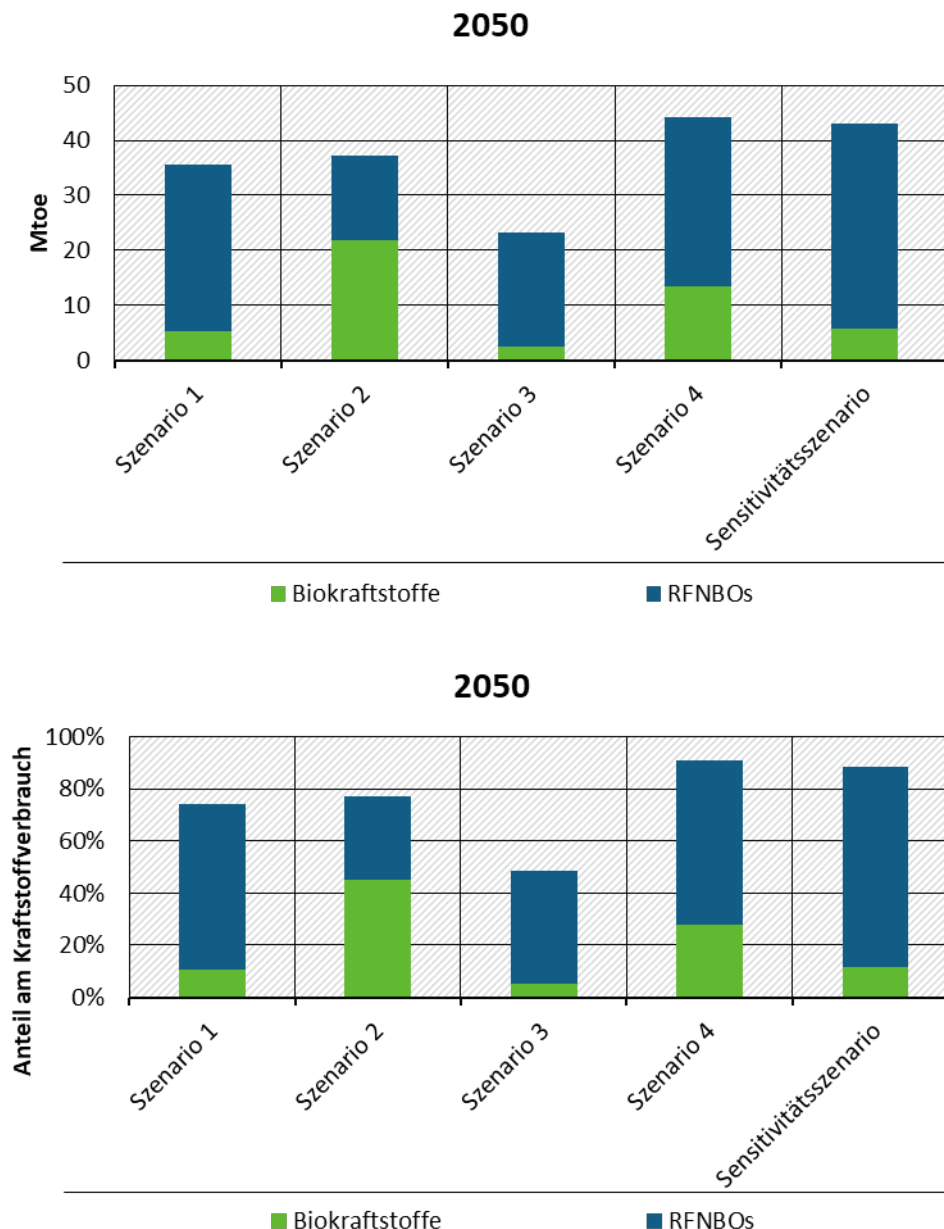


Quelle: eigene Darstellung, E3M

Im Jahr 2050 sind zwischen den Szenarien erhebliche Unterschiede beim Verbrauch und Anteil alternativer Schiffskraftstoffe (Biokraftstoffe und RFNBOs) am Gesamtkraftstoffverbrauch im internationalen Seeverkehr festzustellen (Abbildung 7). Die im internationalen Seeverkehr verbrauchten RFNBOs liegen zwischen 15 und 36 Mio. toe im Jahr 2050. Die Ergebnisse von Szenario 3 zeigen, dass hohe Multiplikatoren den Einsatz von RFNBOs zum Nachteil von Biokraftstoffen erhöhen können (z. B. im Vergleich zu Szenario 2), was gleichzeitig zu einer Verringerung der verbrauchten Menge alternativer maritimer Kraftstoffe (Biokraftstoffe und RFNBOs) um etwa 37 % führt. Der Verbrauch ist am höchsten in den Szenarien, die eine Unterquote für die Erfüllung des Ziels der Treibhausgasintensität im Jahr 2050 vorsehen (Szenario 1, Szenario 4 auf lange Sicht und das Sensitivitätsszenario), was zu Lasten der Biokraftstoffe geht. In Szenario 4 und im Sensitivitätsszenario wird der Einsatz von RFNBOs durch die Erhöhung des Treibhausgasintensitätsminderungsziels weiter vorangetrieben (90 % gegenüber 75 % im Jahr 2050 in den anderen Szenarien). Insbesondere im Sensitivitätsszenario ist die Verbreitung von RFNBOs

höher als die Unterquote (d. h. 75 % gegenüber 63 %), was auf die hohe Wettbewerbsfähigkeit des Preises von RFNBOs im Vergleich zu dem von Biokraftstoffen zurückzuführen ist.

Abbildung 7: Verbrauch von Biokraftstoffen und RFNBOs und Anteil am Kraftstoffmix im internationalen Seeverkehr im Jahr 2050 in den verschiedenen Szenarien



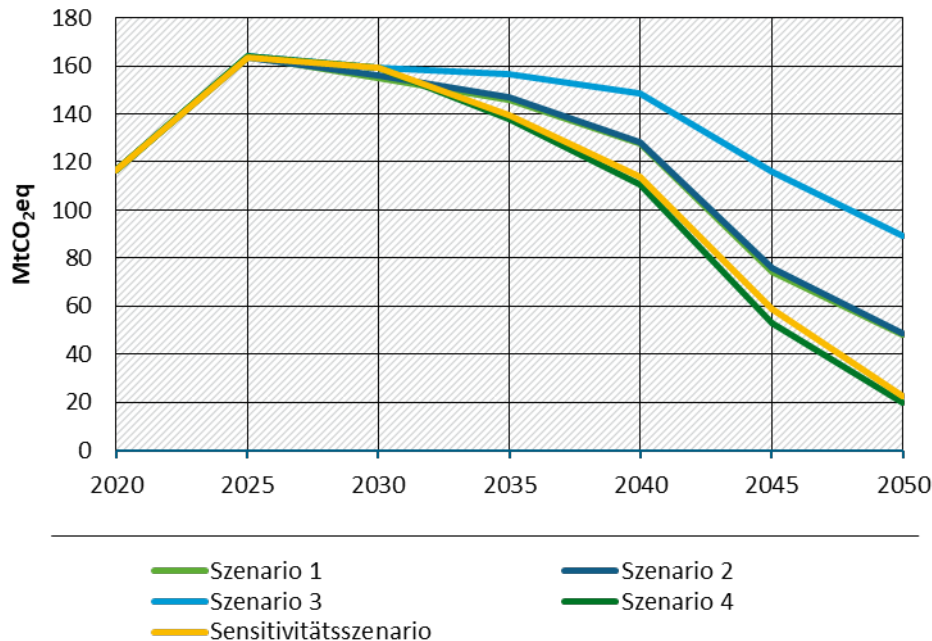
Quelle: eigene Darstellung, E3M

2.4.2 Emissionen

Die Entwicklung der THG-Emissionen des internationalen Seeverkehrs ist in den verschiedenen Szenarien unterschiedlich (Abbildung 8). Insbesondere Szenario 4 (und das auf Szenario 4 basierende Sensitivitätsszenario) erreichen die niedrigsten Emissionen im Jahr 2050 (rund 20 bzw. 25 MtCO₂eq), was auf die deutliche Erhöhung des THG-Intensitätsminderungsziels zurückzuführen ist (d. h. 90 % gegenüber 75 % in allen anderen Szenarien). Szenario 1 und Szenario 2 erreichen im Jahr 2050 ein ähnliches Emissionsniveau (rund 48 MtCO₂eq), da sie beide ein THG-

Intensitätsminderungsziel von 75 % ohne den Beitrag von Multiplikatoren zu diesem Ziel erreichen. Im Gegensatz dazu wird in Szenario 3 dasselbe Ziel mit Multiplikatoren erreicht, so dass das Emissionsniveau im Jahr 2050 wesentlich höher ist (d. h. etwa 85 MtCO₂eq).

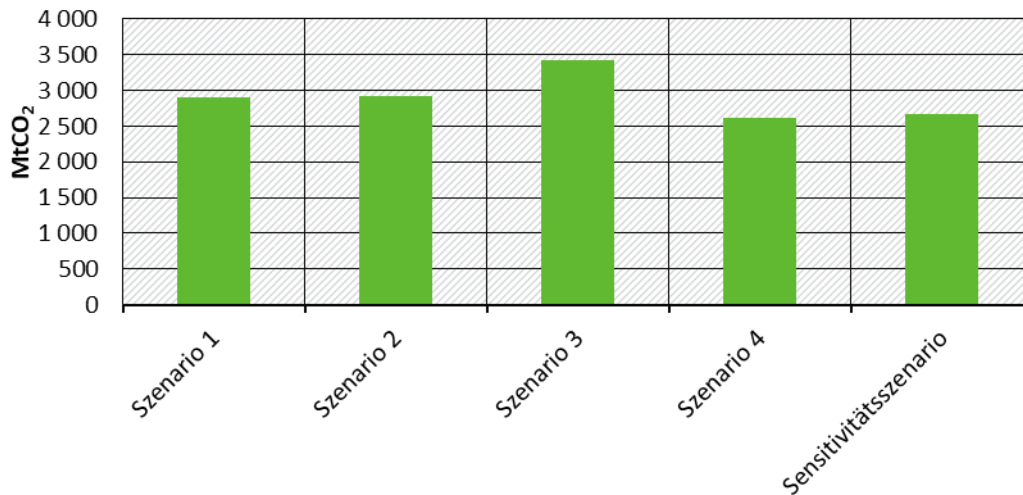
Abbildung 8: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im internationalen Seeverkehr im Zeitraum 2020 bis 2050 auf WTW-Basis (einschließlich Schlupf)



Quelle: eigene Darstellung, E3M

Die unterschiedlichen Auswirkungen der Szenarien werden auch deutlich, wenn man die THG-Emissionen auf kumulierter Basis über den Zeitraum 2021 - 2050 betrachtet (Abbildung 9). In den Szenarien 1 und 2 erreichen die kumulativen Emissionen 2,9 GtCO₂, während der ehrgeizigere Kurs von Szenario 4 und dem Sensitivitätsszenario die kumulativen Emissionen um weitere 0,3 GtCO₂ auf 2,6 GtCO₂ reduziert. Andererseits wird die Erreichung des Treibhausgasintensitätsminderungsziels durch die Förderung von RFNBOs mit hohen Multiplikatoren (Szenario 3) im gleichen Zeitraum zu kumulativen Emissionen von 3,4 GtCO₂ im Zeitraum 2021 - 2050 führen, was die höchsten Emissionen aller Szenarien sind.

Abbildung 9: Kumulative Emissionen des internationalen Seeverkehrs im Zeitraum 2021 - 2050 auf WTW-Basis (ohne Schlupf)

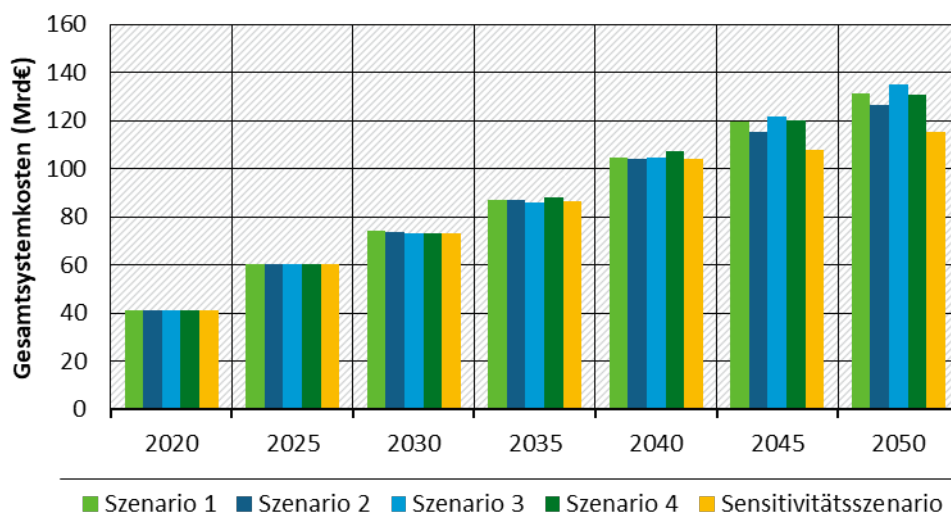


Quelle: eigene Darstellung, E3M

2.4.3 Kosten

Gesamtkosten (Abbildung 10; bestehend aus Kraftstoffkosten, Kapitalkosten, Betriebskosten und variablen Nicht-Kraftstoffkosten) unterscheiden sich in den verschiedenen Szenarien vor allem aufgrund des Anteils der Kraftstoffkosten, der durch den Kraftstoffmix beeinflusst wird (Abbildung 11).

Abbildung 10: Gesamtsystemkosten im internationalen Seeverkehr in den Szenarien

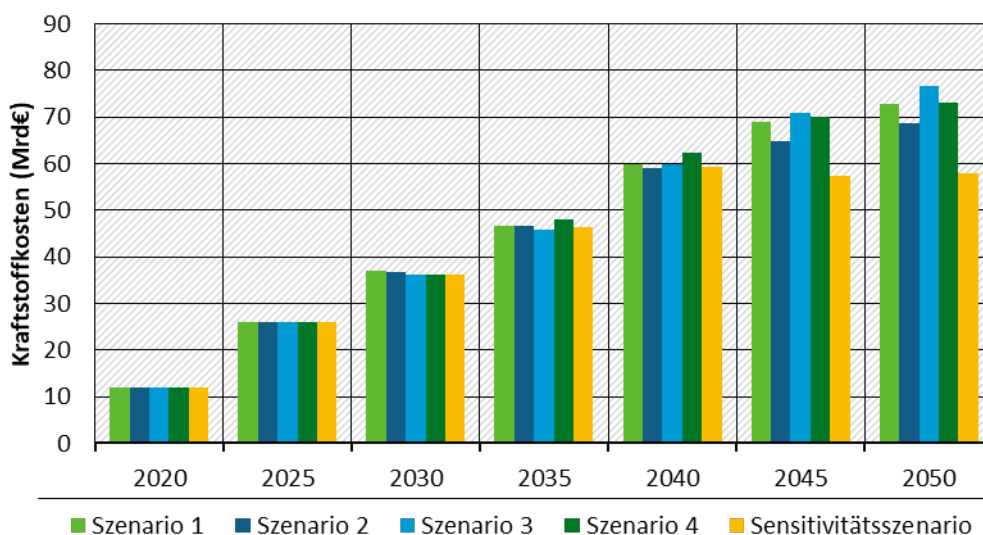


Quelle: eigene Darstellung, E3M

Die Projektionen zeigen für das Jahr 2030 einen geringen Unterschied bei den Gesamtkosten zwischen den Szenarien. Der Grund dafür ist, dass der Energiebedarf in allen Szenarien ähnlich ist (siehe Abbildung 5) und sich nur durch die Zusammensetzung des Kraftstoffmixes unterscheidet (Abschnitt 2.4.1). Im Jahr 2030 ist die Menge der im internationalen Seeverkehr verwendeten alternativen Kraftstoffe relativ gering. Infolgedessen unterscheiden sich die Gesamtkosten und insbesondere die Kraftstoffkosten zwischen den Szenarien im Jahr 2030 um 0,2 bis 0,5 Mrd. €. Mit der zunehmenden Verbreitung alternativer Kraftstoffe im Seeverkehr nach 2030

nimmt auch der Unterschied bei den Gesamtkosten zwischen den Szenarien zu. In Szenario 3 machen fossile Kraftstoffe einen größeren Anteil des Kraftstoffmixes aus als in anderen Szenarien (Abbildung 6 und 7). Erst im Jahr 2050 werden im Szenario 3 RFNBOs kompetitiver als fossile Kraftstoffe. Kraftstoffkosten für fossile steigen dennoch kontinuierlich aufgrund der CO₂-Bepreisung, während Investments in alternative Kraftstoffe nur so weit getätigt werden, wie es für die Erreichung der THG-Minderungsziels nötig ist. Zudem wird der Energieverbrauch reduziert aufgrund der hohen Kraftstoffkosten während es gleichzeitig hohe Kapitalkosten für neue, effiziente Technologien gibt. Somit sind im Jahr 2050 sind die Kraftstoffkosten in Szenario 3 am höchsten. Szenario 4 führt im Jahr 2050 zu ähnlichen Kraftstoffkosten wie Szenario 1, wobei allerdings eine höhere Emissionsreduktion erreicht wird (Abbildung 8). Kumulativ sind die Kraftstoffkosten von Szenario 4 jedoch höher als die von Szenario 1 (um etwa 1,5 %). Bei Szenario 2 sind die Kosten niedriger als bei den Szenarien 1, 3 und 4, was auf den höheren Beitrag von Biokraftstoffen zur Erreichung des Ziels für die Treibhausgasintensität zurückzuführen ist, da ihr Preis im Vergleich zum Preis von E-Fuels niedriger ist (siehe Tabelle 3). Die Auswirkungen des Sensitivitätsszenarios auf die Kraftstoffkosten sind deutlich, da es im Jahr 2050 zu rund 20 % niedrigeren Kraftstoffkosten führt als Szenario 4 (oder rund 10 % kumulativ im Zeitraum 2021 - 2050).

Abbildung 11: Gesamtkraftstoffkosten im internationalen Seeverkehr in den Szenarien



Quelle: eigene Darstellung, E3M

2.5 Fazit

Die vorliegende Studie quantifiziert Szenarien für den internationalen maritimen Sektor der EU für den Zeitraum 2020 - 2050 unter Verwendung des PRIMES-Maritime-Modells auf der Grundlage der vom UBA bereitgestellten und in Zusammenarbeit mit dem Konsortium entwickelten Szenario-Annahmen. Die Szenarien bieten alternative Wege zur Erreichung der Ziele der FuelEU Maritime-Initiative durch die Einführung von Unterquoten und Multiplikatoren, die RFNBOs fördern und gleichzeitig die Treibhausgasintensitätsminderungsziele des Kraftstoffmixes erreichen. Darüber hinaus wurde ein Preissensitivitätsszenario quantifiziert.

Unterquoten sind ein starkes Signal an die Kraftstofflieferanten und ermöglichen so eine höhere Marktdurchdringung von RFNBOs im internationalen Seeverkehr zum Nachteil anderer alternativer maritimer Kraftstoffoptionen wie Biokraftstoffe (Szenario 1, Szenario 4 langfristig). Die ausschließliche Berücksichtigung von Multiplikatoren bei der Förderung von RFNBOs kann zu

höheren Emissionen führen, da die tatsächliche Verbesserung der Treibhausgasintensität des Kraftstoffmixes geringer ist als in anderen Szenarien¹⁵. Außerdem wird die ausschließliche Verwendung von Multiplikatoren langfristig zu höheren Anteilen von fossilen Kraftstoffen (und Kraftstoffkosten auch aufgrund der CO₂-Bepresung) führen (Szenario 3). Die Kombination von Multiplikatoren auf kurze Sicht und Unterquoten für RFNBOs auf längere Sicht mit ehrgeizigeren Zielen für die Treibhausgasintensitätsreduktion des internationalen maritimen Kraftstoffmixes führt im Vergleich zu anderen Szenarien zu den niedrigsten Emissionen und einer höheren Marktdurchdringung von RFNBOs, allerdings bei höheren Kraftstoffkosten (Szenario 4). Positive Annahmen über die Entwicklung der RFNBO-Produktion und damit niedrigere Preise für RFNBOs bei gleichzeitig höheren Preisen für Biokraftstoffe beschleunigen die Marktdurchdringung von RFNBO und verringern die Nachfrage nach Biokraftstoffen (höhere Akzeptanz von RFNBO), so dass die Forderung nach einer RFNBO-Unterquote (Sensitivitätsszenario) nicht relevant wird. Es kann jedoch argumentiert werden, dass zur Erzielung derartiger Kostensenkungen weiterhin Unterquoten erforderlich wären, um Rechts- und Mengensicherheit für die zur Erzielung der Kraftstoffkostensenkung erforderlichen Investitionen zu schaffen.

¹⁵ Die Formeln für die Anwendung der Multiplikatoren sind im Anhang zu finden.

3 Vertiefungsstudien und Stakeholder-Interviews

Anders als im Luftverkehr stehen im Seeverkehr verschiedene nachhaltige Energieversorgungsoptionen in Konkurrenz. Als Konsequenz kann derzeit keine der Optionen eindeutig favorisiert werden. Die verschiedenen Kraftstoffoptionen, die im Sektor diskutiert werden, haben alle ihre Herausforderungen, Vorteile und Trade-offs. Zur Ergänzung der Modellierung (siehe Kapitel 2) und als Hintergrundwissen für die Begleitung der kraftstoffbezogenen Legislativvorhaben, werden folgende Aspekte anhand einer umfangreichen Literaturrecherche sowie Interviews mit Experten und Expertinnen in separaten Vertiefungsstudien beleuchtet:

- ▶ Die Eigenschaften, Produktionsprozesse, -kosten und landseitige Infrastruktur zukünftiger Kraftstoffe (siehe 3.1);
- ▶ Die technischen Aspekte an Bord, inkl. Lagerung, Sicherheit, Kompatibilität von Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle mit den Kraftstoffen, Emissionen und schiffsseitigen Kosten (siehe 3.2);
- ▶ Die Lebenszyklusemissionen zukünftiger Kraftstoffe und wie diese sichergestellt werden können (siehe 3.3)

Die Vertiefungsstudien wurden als separate Publikationen veröffentlicht.¹⁶ Im Rahmen der Vertiefungsstudien werden folgende Kraftstoffoptionen einbezogen: RFNBOs und Biokraftstoffe der zweiten Generation bzw. fortschrittliche Biokraftstoffe.

3.1 Produktion und landseitige Aspekte zukünftiger Kraftstoffe

Vor- und Nachteile zukünftiger Kraftstoffoptionen ergeben sich zunächst aus den grundlegenden Stoffeigenschaften, den Produktionsprozessen und -kosten sowie der vorhandenen und zukünftig nötigen Infrastruktur an Land.

Die Eigenschaften der Kraftstoffe haben Einfluss auf die erforderliche Infrastruktur in den Häfen und an Bord der Schiffe sowie auf die Transportkapazität. Alle potenziellen künftigen Kraftstoffe haben Vor- und Nachteile in Bezug auf Toxizität und Entflammbarkeit. Während E- und Biodiesel den Vorteil haben, ähnliche Eigenschaften wie fossiler Marinediesel (MGO) aufzuweisen, sprechen niedrigere Produktionskosten und einfachere Produktionswege für kohlenstofffreie Kraftstoffe wie Ammoniak, Wasserstoff oder einige Biokraftstoffe.

Die **Produktionswege** und die verwendeten Rohstoffe werden die Nachhaltigkeit sowohl von RFNBOs als auch von Biokraftstoffen beeinflussen. Insbesondere bei Biokraftstoffen ist die Bestimmung der WTT-Emissionen komplex und hängt von den Rohstoffen und den damit verbundenen Landnutzungsänderungen ab.

Zukünftige Lieferketten und Infrastrukturen in Häfen werden sich vom Status Quo unterscheiden. Es gibt noch keine geeignete Bunkerinfrastruktur für Wasserstoff, Ammoniak und Bio-/E-Methanol. Flexiblere **Betankungsoptionen**, wie Truck-to-Ship, werden wahrscheinlich kurz- und mittelfristig für die Versorgung mit (einer Reihe von) alternativen Kraftstoffen in Häfen genutzt werden.

Das Angebot an erneuerbaren Energien und der Ausbau von DAC-Anlagen werden die zukünftigen RFNBO-**Produktionskosten** bestimmen, wobei E-Diesel die teuerste Option und Ammoniak

¹⁶ 1. Vertiefungsstudie – Produktion und landseitige Aspekte zukünftiger Kraftstoffe: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/in-depth-analysis-1-future-fuels>; 2. Vertiefungsstudie – Schiffseitige Voraussetzungen zukünftiger Kraftstoffe: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/in-depth-analysis-2-technical-aspects-of-future>; 3. Vertiefungsstudie – Lebenszyklusemissionen zukünftiger Kraftstoffe: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/in-depth-analysis-3-lifecycle-emissions-of-future>

und Wasserstoff die günstigsten RFNBOs sind. Eher neuartige Umwandlungstechnologien und die Verfügbarkeit von Rohstoffen führen zu Unsicherheiten bei den künftigen Kosten der ausgewählten Biokraftstoffe. Insgesamt verbleibt eine beträchtliche Lücke zwischen den Produktionskosten fossiler Kraftstoffe und zukünftiger mariner Kraftstoffe.

Aus reiner WTT-Perspektive kann der Schluss gezogen werden, dass Ammoniak und Methanol im Hinblick auf die Produktionskosten und den Herstellungsweg die vielversprechendsten künftigen Kraftstoffe zu sein scheinen. Die Verwendung verbesserter Biokraftstoffe im Seeverkehr ist noch ungewiss, da die künftigen Produktionskosten und die Verfügbarkeit von Rohstoffen ungewiss sind. Die Kraftstoffeigenschaften von Wasserstoff begrenzen seine Anwendung im Seeverkehr, und E-Diesel wird viel teurer sein als andere RFNBOs.

3.2 Schiffsseitige Voraussetzungen zukünftiger Kraftstoffe

Aus schiffsseitiger Sicht wird die Eignung eines zukünftigen Kraftstoffs durch seine Eigenschaften bestimmt, die im Vergleich zum fossilen Referenzkraftstoff und anderen zukünftigen Kraftstoffoptionen Vor- und Nachteile aufweisen. Wichtige Aspekte, die von den Eigenschaften beeinflusst werden, sind Sicherheitsvorschriften und Handhabung, Lagerung und Energiegehalt, Motorkompatibilität, TTW-Emissionen sowie die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Kosten. Die Eigenschaften künftiger Kraftstoffe bestimmen auch die Notwendigkeit kleiner oder großer Nachrüstungen oder Neubauten.

Sicherheitsvorkehrungen und -vorschriften sind ein Hindernis für die groß angelegte Einführung künftiger Kraftstoffe in der Schifffahrt. Für Methanol, Ammoniak und Wasserstoff fehlen nämlich noch internationale Sicherheitsvorschriften, die aber für Entscheidungen über künftige Kraftstoffe erforderlich sind (z. B. Investitionen, die zur Einhaltung der Sicherheitsvorschriften erforderlich sind). Es gibt Bedenken hinsichtlich der Toxizität von Methanol und insbesondere Ammoniak. Methanol hat einen Vorsprung mit vorläufigen Richtlinien und ersten in Betrieb befindlichen Methanol-betriebenen Schiffen, während es bei Ammoniak noch an Pilotprojekten und Erfahrungen mangelt. Da die Zeit drängt, dürften die Jahre bis 2030 entscheidend für die technologische Reife und den Wettbewerb zwischen den beiden Kraftstoffen sein.

Es ist klar, dass zukünftige Kraftstoffe voraussichtlich mit Einschränkungen der Transportkapazität oder Reiselänge einhergehen. Vermutlich wird die Anwendung zukünftiger Kraftstoffe (bspw. Ammoniak oder Methanol) Einschränkungen in der Ladungskapazität erfordern, um die Reiselänge beibehalten zu können, oder es werden mehr Tankstopps benötigt. Die tatsächliche Auswirkung der unterschiedlichen Energiedichten zukünftiger Kraftstoffe (außer Bio- und E-Diesel) wird von Faktoren wie Einnahmeverlusten durch Laderaumverluste, der aktuellen Tankfrequenz und Handelsroute sowie der Schiffskonstruktion abhängen. Je nach künftiger Nutzung des Schiffes könnten Schiffseigner sich entschließen, einen Verlust an **Ladekapazität** in Kauf zu nehmen, wenn die Reichweite und das Betankungsmuster beibehalten werden können, während in anderen Fällen eine Verringerung der Ladekapazität nicht erforderlich ist, da die Schiffe einfach häufiger entlang ihrer Handelsroute betankt werden können.

Nur Bio- und E-Diesel können mit MGO gemischt werden. Mit Ausnahme von Ammoniak und Wasserstoff werden die künftigen Kraftstoffe mit den heute auf dem Markt befindlichen Motoren kompatibel sein. **Dual-Fuel-Motoren und Nachrüstooptionen** werden für den Übergang des Sektors von entscheidender Bedeutung sein, um angesichts der Ungewissheit über künftige Kraftstoffe Flexibilität zu gewährleisten. Während viele Nachrüstungen theoretisch möglich sind, besteht die Herausforderung für die Schiffseigner darin, das Kosten-Nutzen-Verhältnis einer Nachrüstung gegenüber einem Neubau zu bewerten und den künftigen Kraftstoffmarkt zu antizipieren.

Zukünftige Kraftstoffe könnten auch in **Brennstoffzellensystemen** verwendet werden. Ihre Anwendung in der Schifffahrt wird jedoch wahrscheinlich auf bestimmte Entfernungen und Schiffstypen beschränkt sein und durch die noch hohen Investitionskosten, das Volumen und das Gewicht eingeschränkt werden.

Ammoniak und Wasserstoff bieten aus Sicht der TTW die größte **Treibhausgasminderung**. Wenn nur die CO₂-Emissionen berücksichtigt werden (wie im EU-ETS-Vorschlag der Europäischen Kommission für den Seeverkehr), besteht ein Anreiz, nicht nur Ammoniak und Wasserstoff, sondern auch Bio- oder E-Methan zu verwenden. Die tatsächlichen Klimaauswirkungen aller künftigen Kraftstoffe werden durch ihre WTW-Emissionen bestimmt. Wenn die Politik nur die THG-Emissionen im TTW berücksichtigt, unterscheiden sich die Klimavorteile zukünftiger kohlenstoffbasierter Kraftstoffe nicht von ihren fossilen Pendanten, und selbst kohlenstofffreie zukünftige Kraftstoffe mit hohen WTT-Emissionen wären konform.

Die **Luftschadstoffwerte** (vor allem SO_x) zukünftiger Kraftstoffe erfüllen die Anforderungen von marinen Emissionskontrollgebieten, z. B. in EU-Gewässern, und zukünftige Kraftstoffe können so geringere Gesundheitsrisiken für die Bevölkerung in Küstenregionen bieten bzw. können genauso wie fossile Kraftstoffe zusammen mit Abgasnachbehandlungssystemen genutzt werden. Die Verwendung künftiger Kraftstoffe ist daher auch aus gesundheitlicher Sicht von Vorteil.

Die technischen Herausforderungen an Bord sind geringer als die Herausforderung einer ausreichenden Versorgung mit künftigen Kraftstoffen, und dass es einen Business Case gibt, um Investitionen in künftige Kraftstoffe (und für künftige Kraftstoffe geeignete Schiffe) z. B. durch klimapolitische Maßnahmen/Verordnungen zu fördern. Die politischen Entscheidungsträger müssen daher **geeignete Investitionsbedingungen für die Produktion künftiger Kraftstoffe schaffen** (z.B. Rahmenbedingungen für die Senkung der Produktionskosten) und die richtigen Anreize setzen, damit die Schiffseigner langfristige Entscheidungen treffen können. Interviewte Experten und Expertinnen der Branche betonen, dass in der Schifffahrtsbranche relativ schnell Entscheidungen getroffen werden können, wenn Gewissheit besteht. Als beispielsweise die globalen Schwefelvorschriften der IMO verbindlich wurden, waren die Wäscher schnell ausverkauft.

Aus der „**Total Cost of Ownership**“-Perspektive werden die Kraftstoffkosten die Wahl des künftigen Kraftstoffs bestimmen. Studien haben ergeben, dass sowohl mit Methanol als auch mit Ammoniak betriebene Schiffe in Zukunft die niedrigsten Total Cost of Ownership aufweisen werden, wobei davon ausgegangen wird, dass fortschrittliche Biokraftstoffe auch in Zukunft begrenzt und teuer sein werden.

3.3 Lebenszyklusemissionen zukünftiger Kraftstoffe

THG-Emissionen zukünftiger Kraftstoffe können entlang des gesamten Lebenszyklus auftreten, wobei einige Schritte für die Klimaneutralität von größerer Bedeutung sind als andere: die erneuerbare Energie- und Stromversorgung, die Nutzung einer nachhaltigen CO₂-Quelle, sowie die Vermeidung indirekter Landnutzungsänderungen (ILUC).

Für RFNBOs sind die per Definition wichtigsten Stellschrauben zur Emissionsminderung die Nutzung erneuerbarer Elektrizität und Energie sowie einer nachhaltigen CO₂-Quelle wie DAC. Es besteht das Risiko von **vorgelagerten Emissionen** im Falle von Biokraftstoffen in Abhängigkeit von den verwendeten Ausgangsrohstoffen. Schätzungen von vorgelagerten Leckagen und (indirekten) Emissionen aus Landnutzungsänderungen sind mit großer Unsicherheit behaftet. Diese Unsicherheit muss daher in Regelwerken zur Zertifizierung von Kraftstoffen entsprechend berücksichtigt werden, indem Transparenz geschaffen wird oder bestimmte Ausgangsrohstoffe ausgeschlossen werden.

Die Bedeutung kleinerer Emissionsquellen wird mit einem zunehmend dekarbonisierten System relativ zunehmen (z.B. Transport von Brennstoffen, etwaige Leckagen und Motorenschlupf, Pilotbrennstoffe). Besonders die Produktionsketten gasförmiger zukünftiger Kraftstoffe (Wasserstoff, Ammoniak, Methan) sind anfällig für **flüchtige Emissionen** (z.B. Wasserstoff) entlang von Pipelines, Produktionsanlagen oder durch sogenanntes Boil-off-Gas. Die Nutzung von E- oder Biomethan wird wahrscheinlich nie vollständig klimaneutral sein, da (Motoren-) Schlupf oder flüchtige Emissionen entlang der Produktionskette nicht ganz ausgeschlossen werden können.

Bei der Wahl künftiger Brennstoffe muss auch der **kumulierte Energieverbrauch** entlang der Produktionspfade berücksichtigt werden, da die Kapazitäten der erneuerbaren Energien angesichts der prognostizierten Nachfrage nach RFNBOs begrenzt sein werden. Kraftstoffe mit einem hohem kumulierten Energieverbrauch (bspw. durch viele Prozessschritte und entsprechenden Effizienzverlust) sind somit nachteilig gegenüber Kraftstoffen mit einem geringen kumulierten Energieverbrauch wie Wasserstoff.

Unter den heutigen Produktionsbedingungen ist die **Erzeugung** erneuerbarer Energie (einschließlich des Baus von PV-Anlagen oder Windkraftanlagen) auch mit Treibhausgasemissionen verbunden. Diese Emissionen könnten perspektivisch jedoch abnehmen, je weiter die Umstellung der Branche auf eine klimaneutrale Produktion voranschreitet, aber sie werden nicht vollständig klimaneutral werden (so dass zum Ausgleich dieser Emissionen negative Emissionen erforderlich sein werden).

Es wird klare Guidelines für die Berechnung von Lebenszyklusemissionen und **robuste Zertifizierungssysteme** geben müssen, damit Emissionsminderungen und die Compliance mit politischen Instrumenten (z.B. FuelEU Maritime) sichergestellt werden kann. Es gibt eine Reihe an wichtigen Aspekten, die in Zertifizierungssystemen berücksichtigt werden sollten (wie z.B. die Versorgung mit erneuerbarem Strom und die CO₂-Quelle für RFNBOs). Es gibt bereits mehrere Initiativen zur Zertifizierung von RFNBOs und Biokraftstoffen. Idealerweise ergibt sich ein globaler gemeinsamer Rahmen für die internationalen Transportsektoren (wie die laufende Entwicklung von Lebenszyklus-Richtlinien im Rahmen der IMO).

3.4 Fazit

Generell bergen Kraftstoffe, die den heutigen fossilen marinen Kraftstoffen am unähnlichsten sind, die größten Herausforderungen. Während diesel-ähnliche synthetische und Biokraftstoffe bei vielen Aspekten zwar wie die heutigen fossilen Kraftstoffe behandelt werden können, sind bio- und E-Diesel voraussichtlich die teuerste Kraftstoffoption bis 2050 und Biodiesel die am geringsten verfügbare Option. Nachhaltige Biokraftstoffe können auf lange Sicht keinen großen Beitrag zur Dekarbonisierung des Sektors leisten aufgrund von begrenzter Verfügbarkeit und der unsichereren Bilanzierung der Treibhausgasemissionen. Kurzfristig können Biokraftstoffe allerdings bereits einen Beitrag zur Senkung der Emissionen leisten, da diese eher verfügbar sind als RFNBOs.

Basierend auf der Betrachtung von landseitigen wie schiffseitigen Aspekten, erscheinen E-Methanol und E-Ammoniak als die Kraftstoffe mit der größten Chance substantielle Marktanteile im Kraftstoffmarkt für den internationalen Seeverkehr zu erlangen. Während Ammoniak voraussichtlich günstigere Produktionskosten als Methanol vorweisen kann, sind einige Aspekte der Ammoniaknutzung noch unklar oder problematisch (sichere Handhabung an Bord und im Hafen, Toxizität, Verfügbarkeit von Motoren und Verbrennungsemissionen).

Damit zukünftige Kraftstoffe einen Beitrag zur Dekarbonisierung des Seeverkehrs beitragen können, muss entlang des gesamten Lebenszyklus sichergestellt werden, dass so wenig Treibhausgasemissionen wie möglich entstehen. Besonders wichtig sind für RFNBOs die (zusätzliche)

Bereitstellung von erneuerbarem Strom/Energie und einer nachhaltigen CO₂-Quelle. Flüchtige Emissionen durch Leckagen und Schlupf sind vor allem für gasförmige Kraftstoffe ein Risiko. Zudem ist aufgrund der absehbar begrenzten Kapazität an erneuerbarem Strom der kumulative Energieaufwand der verschiedenen Produktionspfade zu beachten. Klare Vorgaben für die Ermittlung von Lebenszyklusemissionen und robuste Zertifizierungssysteme sind nötig, um die zuvor genannten Aspekte zu adressieren.

Im Diskurs mit Experten und Expertinnen wird klar, wo einerseits Unsicherheit und Forschungsbedarf besteht (TTW-Emissionen, zukünftiger Verfügbarkeit und Kraftstoffkosten) und dass andererseits klare politische Vorgaben und Maßnahmen gewünscht werden, um langfristige Investitionen tätigen zu können. Zudem zeigt auch die Literaturrecherche, dass Politikinstrumente so gestaltet werden müssen, dass die verschiedenen Marktsegmente und Schiffstypen im Seeverkehr die für sich beste klimaneutrale Energieversorgungsoptionen wählen können. Die beste Kraftstoffoptionen für ein Hochseecontainerschiff ist nicht zwangsläufig die beste Option für eine Fähre im Küstenbereich.

4 Schlussfolgerungen

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Verhandlungen zu den drei kraftstoffbezogenen Legislativvorhaben (FuelEU Maritime, ReFuelEU Aviation und RED) zu begleiten, vor allem im Hinblick auf deren Beitrag zur Erreichung der EU-Klimaziele. Neben ad-hoc Beratung wurde dieses Ziel adressiert durch die Modellierung verschiedener Ausgestaltungsmöglichkeiten der FuelEU Maritime Initiative. In einer allgemeineren Betrachtung in drei Vertiefungsstudien wurde der Eignung und Potenziale verschiedener zukünftiger, alternativer Kraftstoffe nachgegangen, um den politischen Prozess der Legislativvorhaben mit wissenschaftlicher Expertise zu unterfüttern.

Die Ergebnisse der Modellierung verschiedener Ausgestaltungsmöglichkeiten der FuelEU Maritime Initiative haben gezeigt, dass Unterquoten ein starkes Signal an die Kraftstofflieferanten senden und eine höhere Marktdurchdringung von erneuerbaren Kraftstoffen nicht-biologischen Ursprungs (renewable fuels of non-biological origin, RFNBOs) bei Verringerung der Nachfrage nach Biokraftstoffen im internationalen Seeverkehr ermöglichen. Die Einführung von Multiplikatoren zur Förderung von RFNBOs ohne entsprechende Erhöhung der Minderungsziele kann jedoch zu höheren Emissionen führen, da die tatsächliche Verbesserung der Treibhausgasintensität des Kraftstoffmixes geringer ist als in anderen modellierten Szenarien, die auch eine Unterquote berücksichtigen. Die höchsten Emissionsminderungen und eine höhere Marktdurchdringung von RFNBOs kann auf Basis der Modellierung durch die Kombination von Multiplikatoren auf kurze Sicht und Unterquoten für RFNBOs auf längere Sicht mit ehrgeizigeren Minderungszielen für die Treibhausgasintensität des internationalen maritimen Kraftstoffmixes erzielt werden. Allerdings könnte diese Kombination auch zu höheren Kraftstoffkosten führen. Die Modellierung wurde durchgeführt als die Trilogverhandlungen zur FuelEU Maritime Verordnung noch nicht abgeschlossen waren. Die Ergebnisse haben den politischen Prozess informiert. Die finale Einigung des Trilogs spiegelt die abgeleitete Empfehlung der Modellierung zumindest teilweise wider: Das Trilogergebnis (EU 2023) enthält ambitioniertere Ziele für die Senkung der Treibhausgasintensität, einen kurzzeitigen RFNBO-Multiplikator bis 2033 und eine konditionale Unterquote für RFNBOs Mitte der 2030er Jahre. Auf Basis der Modellierung kann argumentiert werden, dass eine Einführung einer Unterquote eine bessere Marktdurchdringung von RFNBOs durch eine erhöhte Rechts- und Mengensicherheit für Investitionen sichern kann. Zukünftige, geplante Revisionen der Verordnung könnten dies berücksichtigen.

Die Vertiefungsstudien haben sich mit verschiedenen Aspekten zukünftiger, alternativer Kraftstoffe für den Seeverkehr befasst: die Kraftstoffproduktion und landseitige Infrastruktur, die schiffseitigen Voraussetzungen, und die Lebenszyklusemissionen der Kraftstoffe. Hierbei wurden die Vor- und Nachteile der ausgewählten nachhaltigen Biokraftstoffe und RFNBOs erläutert und was dies für die Instrumentengestaltung bedeutet.

Im Allgemeinen stellen Kraftstoffe, die den heutigen fossilen Schiffskraftstoffen am wenigsten ähnlich sind, die größten Herausforderungen dar. Andererseits sind Kraftstoffe wie E-Diesel auch wesentlich teurer und ineffizienter als andere Kraftstoffoptionen wie Wasserstoff oder Ammoniak. Unter Berücksichtigung sowohl der landseitigen als auch der schiffsseitigen Aspekte scheinen E-Methanol und E-Ammoniak die größten Chancen zu haben, erhebliche Marktanteile auf dem Kraftstoffmarkt für die internationale Schifffahrt zu gewinnen. Nachhaltige Biokraftstoffe können aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit und der unsicheren Treibhausgasbilanzierung langfristig keinen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung des Sektors leisten. Die finale Version der FuelEU Maritime Verordnung adressiert diese Vor- und Nachteile verschiedener Kraftstoffe dadurch, dass sie technologieneutral gestaltet ist, indem sie einen Treibhausgasintensitätsgrenzwert setzt.

Klare Vorgaben für die Ermittlung von Lebenszyklusemissionen und robuste Zertifizierungssysteme sind nötig, um die entsprechende Treibhausgasminde rung der Kraftstoffe auch wirklich zu erreichen. Besonders wichtig für die Lebenszyklusemissionen von RNFBOs, wie E-Ammoniak und E-Methanol, sind die Bereitstellung von zusätzlichem erneuerbarem Strom/Energie und einer nicht-fossilen CO₂-Quelle. Die neuen Legislativvorhaben der EU gehen hierbei in die richtige Richtung, indem alternative Kraftstoffe durch die RED bestimmte Standards erfüllen müssen.¹⁷ Flüchtige Emissionen durch Leckagen und Schlupf sind vor allem für gasförmige Kraftstoffe ein Risiko. Die FuelEU Maritime Verordnung berücksichtigt durch ihre Technologieoffenheit zwar, dass noch unklar ist, welcher Kraftstoff den Sektor dominieren wird, aber ihr Ambitionslevel ermöglicht eine zu lange Nutzung fossiler Kraftstoffe (vor allem LNG mit entsprechendem Methanschlupfrisiko und möglichem „Lock-in“-Effekt).

Es gibt viele Faktoren, die berücksichtigt werden sollten, wenn es um die Eignung eines Kraftstoff für die Hochseeschifffahrt geht. Dies sind u.a. Kosten, Handhabbarkeit, technische Kompatibilität, Risiko, Treibhausgasminde rung, Verfügbarkeit. Die Vertiefungsstudien zeigen, dass Politikinstrumente so gestaltet werden müssen, dass Wahlfreiheit bestehen kann für die verschiedenen Marktsegmente und Schiffstypen im Seeverkehr im Bezug auf die individuell beste klimaneutrale Energieversorgungsoption. Die Ausgestaltung des maritimen EU-ETS und der FuelEU Maritime Verordnung machen dies möglich. Allerdings sind die Anreize für die in vielerlei Hinsicht vorteilhaften RNFBOs (siehe oben) ausbaufähig. Auch der sich aus den Vertiefungsstudien ergebende Fokus auf die landseitige Infrastruktur und Produktion von alternativen Kraftstoffen für den Seeverkehr könnte durch EU-Regulierung noch weiter gestärkt werden. Die Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR) macht beispielsweise keine Vorgaben bezüglich RNFBOs oder nachhaltiger Biokraftstoffe für den Seeverkehr und in der FuelEU Maritime Initiative fehlt ein Anreiz ähnlich dem in der ReFuelEU Aviation, der Kraftstofflieferanten in die Pflicht nimmt oder zumindest Sicherheit schafft (wie z.B. eine klare, längerfristige Quote).

Insgesamt hat das Forschungsvorhaben somit einerseits konkret den politischen Prozess zu den kraftstoffbezogenen Legislativvorhaben begleitet und andererseits wichtige Erkenntnisse und Aspekte für zukünftige Nachbesserungen in Bezug auf alternative Kraftstoffe für den Seeverkehr aufgezeigt.

¹⁷ Auch kohlenstoffarme Kraftstoffe müssen den einschlägigen Bestimmungen eines Rechtsakts der Union über die Binnenmärkte für erneuerbare Gase und Erdgas sowie für Wasserstoff genügen und einer Zertifizierung unterliegen.

5 Quellenverzeichnis

EC - European Commission (2019): The European Green Deal, Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2019) 640 final. Brussels, 11.12.2019. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN>, zuletzt geprüft am 22.11.2023.

EC - European Commission (2020a): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions, Stepping up Europe's 2030 climate ambition. Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people. COM(2020) 562 final. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/eu-climate-action/docs/com_2030_ctp_en.pdf.

EC - European Commission (2020b): COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future (COM(2020) 789 final). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:789:FIN>, zuletzt geprüft am 22.11.2023.

EC - European Commission (2021a): Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652 (COM(2021) 557 final). Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:dbb7eb9c-e575-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF, zuletzt geprüft am 03.11.2022.

EC - European Commission (2021b): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport (COM(2021) 561 final). Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/refueleu_aviation_-_sustainable_aviation_fuels.pdf, zuletzt geprüft am 23.08.2021.

EC - European Commission (2021c): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC, COM(2021) 562 final. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0562>, zuletzt geprüft am 13.12.2022.

EU - European Union (2023): Regulation (EU) 2023/1805 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1805>, zuletzt geprüft am 20.11.2023.

Material Economics (2021): EU Biomass Use in A Net-Zero Economy, A Course Correction for EU Biomass. Online verfügbar unter <https://www.climate-kic.org/wp-content/uploads/2021/06/MATERIAL-ECONOMICS-EU-BIOMASS-USE-IN-A-NET-ZERO-ECONOMY-ONLINE-VERSION.pdf>.

A Anhang

PRIMES-Maritime Modellbeschreibung

Ziel des PRIMES-Maritime-Modells ist es, langfristige Energie- und Emissionsprojektionen bis zum Jahr 2050 für jeden einzelnen EU-Mitgliedstaat zu erstellen. Der Erfassungsbereich des Modells umfasst sowohl den innereuropäischen Seeverkehr als auch den Extra-EU-Seeverkehr. PRIMES-Maritime konzentriert sich nur auf die EU-Mitgliedstaaten und den Extra-EU-Handel in und aus der EU. Das Modell besteht aus einem modularen Aufbau: 1) Das Nachfragemodul projiziert die Seeverkehrsaktivitäten für jeden EU-Mitgliedstaat nach Ladungsart und nach dem entsprechenden Partner. Ökonometrische Funktionen setzen die künftige Nachfrage nach Seeverkehrsdienstleistungen in Beziehung zu den wirtschaftlichen Triebkräften wie BIP, Energienachfrage (Öl, Kohle, LNG), internationale Kraftstoffpreise und bilateraler Handel nach Produktart; 2) Das Angebotsmodul simuliert einen virtuellen Betreiber, der die EU-Flotte kontrolliert, die angeforderten Seeverkehrsdienstleistungen erbringt und die Schiffe für Tätigkeiten auf den verschiedenen Märkten (EU-Mitgliedstaaten und Extra-EU-Gebiet, das mit der EU Handel treibt) einsetzt, auf denen unterschiedliche Regulierungssysteme gelten können (z. B. ECA-Zonen). Der politische Input umfasst Emissionen (CO₂, Luftverschmutzung) und Energieeffizienzstandards (EEDI für neue Schiffe, SEEMP), Kraftstoffstandards und potenzielle Kraftstoffmandate. Die Schiffsflotte wird je nach Ladungsart in mehrere Kategorien unterteilt. Es handelt sich um ein dynamisches Modell, das ein Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage herstellt und dabei Schiffsalter und Flottenerneuerungsbedarf mit einer Stock-Flow-Beziehung berücksichtigt. Der Kapitalumschlag ist in dem Modell explizit berücksichtigt und beeinflusst das Tempo der Brennstoffsubstitution. Die Wahl des Treibstoffmixes für neue Schiffe basiert auf technisch-ökonomischen Annahmen unter Anwendung der diskreten Wahlmodellierung. Das Modell projiziert den Bunkerverbrauch für alle Brennstofftypen und leitet daraus WTT- und TTW-THG-Emissionen ab, einschließlich Methanschlupfemissionen aus der Verbrennung. Der Energieverbrauch basiert auf spezifischen Brennstoffverbrauchsfunktionen, die Kosteneffizienzkurven verwenden, um Effizienzmöglichkeiten zusammenzufassen.

Die vollständige Modellbeschreibung ist online zu finden unter:

<http://www.e3mlab.eu/e3mlab/PRIMES%20Manual/The%20PRIMES%20MO-DEL%202018.pdf>

Index der Treibhausgasintensität

Die folgende Gleichung zeigt die Berechnung des Treibhausgasintensitätsindex auf der Grundlage des Vorschlags von FuelEU Maritime (Gleichung 1):

Index der Treibhausgasintensität	WtT	TtW
$GHG \text{ intensity index } \left[\frac{gCO_2eq}{MJ} \right] =$	$\frac{\sum_i^{n \text{ fuel}} M_i \times CO_{2eq \text{ WtT},i} \times LCV_i + \sum_k^c E_k \times CO_{2eq \text{ electricity},k}}{\sum_i^{n \text{ fuel}} M_i \times LCV_i + \sum_k^c E_k}$	$\frac{\sum_i^{n \text{ fuel}} \sum_j^{m \text{ engine}} M_{i,j} \times \left[\left(1 - \frac{1}{100} C_{slip j} \right) \times (CO_{2eq,TtW,j}) + \left(\frac{1}{100} C_{slip j} \times CO_{2eq \text{ TtW},slip,j} \right) \right]}{\sum_i^{n \text{ fuel}} M_i \times LCV_i + \sum_k^c E_k}$

Die folgende Gleichung zeigt die Einbeziehung des Multiplikators in die Berechnung des Treibhausgasintensitätsindex (Gleichung 2)¹⁸:

Index der Treibhausgasintensität	WtT	TtW
$GHG \text{ intensity index } \left[\frac{gCO_2eq}{MJ} \right] =$	$\frac{\sum_i^{n \text{ fuel}} M_i \times CO_{2eq \text{ WtT},i} \times LCV_i + \sum_k^c E_k \times CO_{2eq \text{ electricity},k}}{\sum_i^{n \text{ fuel}} M_i \times LCV_i \times \mathbf{Mult}_i + \sum_k^c E_k}$	$\frac{\sum_i^{n \text{ fuel}} \sum_j^{m \text{ engine}} M_{i,j} \times \left[\left(1 - \frac{1}{100} C_{slip j} \right) \times (CO_{2eq,TtW,j}) + \left(\frac{1}{100} C_{slip j} \times CO_{2eq \text{ TtW},slip,j} \right) \right]}{\sum_i^{n \text{ fuel}} M_i \times LCV_i \times \mathbf{Mult}_i + \sum_k^c E_k}$

wobei die folgende Formel als Gleichung (3) bezeichnet wird:

$$CO_{2eq,TtW,j} = \left(C_{fCO_2,j} \times GWP_{CO_2} + C_{fCH_4,j} \times GWP_{CH_4} + C_{fN_2O,j} \times GWP_{N_2O} \right)_i$$

¹⁸ Angepasst auf der Grundlage der vom UBA bereitgestellten Informationen

Begriff	Erläuterung
i	Index, der den im Berichtszeitraum an das Schiff gelieferten Brennstoffen entspricht
j	Index, der den Brennstoffverbrauchseinheiten an Bord des Schiffes entspricht. Für die Zwecke dieser Verordnung gelten als Brennstoffverbraucher die Hauptmaschine(n), die Hilfsmaschine(n), die Kessel, die Brennstoffzellen und die Abfallverbrennungsanlagen
k	Index für die Anschlusspunkte der landseitigen Stromversorgung.
n	Gesamtzahl der während des Berichtszeitraums an das Schiff gelieferten Brennstoffe
c	Gesamtzahl der Anschlusspunkte für die Stromversorgung an Land
m	Gesamtzahl der Brennstoffverbrauchseinheiten
$M_{i,j}$	Masse des von der Brennstoffverbrauchseinheit j verbrauchten Brennstoffs i [gFuel]
E_k	An das Schiff gelieferte Elektrizität je Anschlusspunkt der Landstromversorgung k [MJ]
$CO_{2eqWtT,i}$	WtT THG-Emissionsfaktor des Brennstoffs i [gCO _{2eq} /MJ]
$CO_{2eq}electricity,k$	WtT Treibhausgasemissionsfaktor für die an das Schiff am Liegeplatz gelieferte Elektrizität je Anschlusspunkt der Landstromversorgung k [gCO _{2eq} /MJ]
LCV_i	Unterer Heizwert des Brennstoffs i [MJ/gBrennstoff]
$Mult_i$	Handelt es sich bei dem Brennstoff i um einen erneuerbaren Brennstoff nicht-biologischen Ursprungs, kann ein Belohnungsfaktor von X für den Zeitraum bis zum 1. Januar 2030, Y für den Zeitraum vom 1. Januar 2030 bis zum 1. Januar 2035 und Z für den Zeitraum danach angewandt werden, wobei X, Y und Z durch das untersuchte Szenario (falls zutreffend) bestimmt werden.
$C_{engineslipj}$	Koeffizient für nicht verbrannte Brennstoffe) als Prozentsatz der Masse des von der Brennstoffverbrauchereinheit j verbrauchten Brennstoffs i [%]. Cslip umfasst flüchtige und entweichende Emissionen.
$C_{fCO_2,j}, C_{fCH_4,j}, C_{fN_2O,j}$	TtW-THG-Emissionsfaktoren nach verbranntem Brennstoff in Brennstoffverbrauchereinheit j [gGHG/gFuel]
$CO_{2eq,TtW,j}$	TtW CO ₂ äquivalente Emissionen des verbrannten Brennstoffs i in der Brennstoffverbrauchereinheit j [gCO ₂ eq/gFuel] $CO_{2eq,TtW,j} = \left(C_{cfCO_2,j} \times GWP_{CO_2} + C_{cfCH_4,j} \times GWP_{CH_4} + C_{cfN_2O,j} \times GWP_{N_2O} \right)_i$
$C_{sfCO_2,j}, C_{sfCH_4,j}, C_{sfN_2O,j}$	TtW-THG-Emissionsfaktoren nach entfallenem Brennstoff für die Brennstoffverbrauchereinheit j [gGHG/gFuel]
$CO_{2eq,TtWslippage,j}$	TtW CO ₂ äquivalente Emissionen des entnommenen Brennstoffs i gegenüber dem Brennstoffverbraucher j [gCO ₂ eq/gFuel] $CO_{2eq,TtWslippage,j} = \left(C_{sfCO_2,j} \times GWP_{CO_2} + C_{sfCH_4,j} \times GWP_{CH_4} + C_{sfN_2O,j} \times GWP_{N_2O} \right)_i$ wobei: $C_{sf} CO_2$ und $C_{sf} N_2O$ auf Null gesetzt werden.
$GWP_{CO_2}, GWP_{CH_4}, GWP_{N_2O}$	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O Treibhauspotenzial über 100 Jahre, die in der Richtlinie (EU) 2018/2001, Absatz 4, Teil C von Anhang V definiert sind