

Für Mensch und Umwelt

November 2021

Klimaschutz im Luft- und Seeverkehr: Roadmaps zur Erreichung des Klimaziels

Strategiepapier Seeverkehr

von

Martin Cames, Jakob Graichen, Peter Kasten, Sven Kühnel
Öko-Institut, Berlin

Jasper Faber, Dagmar Nelissen, Hary Shanthi
CE Delft, Delft (NL)

Janina Scheelhaase, Wolfgang Grimme, Sven Maertens
German Aerospace Center, Cologne

Öko-Institut

Borkumstr. 2
13189 Berlin
Telefon: +49 (0) 30 40 50 85-0

CE Delft

Oude Delft 180
2611 HH Delft, (NL)
Telefon: +31 15 215 0150

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Linder Höhe
51147 Köln
Telefon: +49 2203 601-0

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	3
Abkürzungsverzeichnis.....	4
1.1 Herausforderungen.....	6
1.2 Schwerpunkt und Umfang.....	7
1.3 Struktur.....	9
2.1 Determinanten der Energienachfrage und der CO ₂ -Emissionen.....	10
2.2 Prognosen zum Energiebedarf und zu den CO ₂ -Emissionen.....	11
3.1 Barrieren.....	12
3.2 Politische Instrumente.....	16
4.1 Technischer und marktbezogener Status quo.....	18
4.2 Produktionskosten und Preise.....	20
4.3 Treibhausgasminderungspotenzial.....	22
4.4 Gesamtwirkungsgrad der Umwandlung.....	23
4.5 Zusammenfassung.....	26
5.1 E-Methanol-Roadmap.....	28
5.1.1 Nationale Aktivitäten.....	28
5.1.2 Europäische Politik.....	29
5.1.3 Internationale Zusammenarbeit.....	30
5.2 Technologie-offene Roadmap.....	31
5.2.1 Nationale Aktivitäten.....	31
5.2.2 Europäische Politik.....	32
5.2.3 Internationale Zusammenarbeit.....	33
5.3 Vergleich.....	33

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Faktoren, welche die CO ₂ -Emissionen des Seeverkehrs bestimmen.....	10
Abbildung 2:	Produktionsschritte für verschiedene E-Kraftstoffe.....	19
Abbildung 3:	Verschiedene Produktionskostenszenarien für die Herstellung von flüssigem E-Kraftstoff an einem günstigen Standort für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (MENA-Region)	21
Abbildung 4:	THG-Emissionen der Produktion von flüssigen E-Kraftstoffen und E-Wasserstoff in Abhängigkeit von der THG-Intensität des Stromeinsatzes	22
Abbildung 5:	Überblick über die verschiedenen Prozessketten von E-Fuel	24
Abbildung 6:	Roadmap für E-Methanol	35
Abbildung 7:	Technologieoffene Roadmap	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung der Energiebedarfs- und CO ₂ -Emissionsprognosen.....	11
Tabelle 2:	Sicherheitsrelevante Merkmale der Kraftstoffe.....	13
Tabelle 3:	Überblick über die wichtigsten Vorteile, Nachteile und Hindernisse bei der Verwendung von Kraftstoffen.....	13
Tabelle 4:	Vergleich des technischen Stands und des kurzfristigen Potenzials von E-Kraftstoffen	20
Tabelle 5:	Umwandlungswirkungsgrad von Strom in Endenergieträger für verschiedene E-Kraftstoffe	25
Tabelle 6:	Bewertung der Wirkungskategorien für verschiedene E-Kraftstoffe (langfristige Perspektive).....	26

Abkürzungsverzeichnis

BAU	Business as usual
CAPEX	Investitionsausgaben
CO₂	Kohlendioxid
DAC	Direkte Luftabscheidung
DME	Dimethylether (C ₂ H ₆ O)
ECA	Emissionskontrollbereiche
EJ	Exajoule (10 ¹⁸ Joule)
EU	Europäische Union
F&E	Forschung & Entwicklung
THG	Treibhausgas
GoO	Herkunftsnachweis
LH₂	Flüssiger Wasserstoff
HFO	Schweres Heizöl
ICAO	Internationale Zivilluftfahrt-Organisation
ICE	Verbrennungsmotor
IEA	Internationale Energieagentur
IMO	Internationale Seeschiffahrtsorganisation
LHV	Unterer Heizwert
LNG	Flüssigerdgas
LPG	Flüssiggas
MARPOL	Internationales Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe
MENA	Naher Osten und Nordafrika
MJ	Megajoule
Mt	Megatonne (10 ⁶ Tonnen)
MW	Megawatt
NO_x	Stickstoffoxide
OPEX	Operative Ausgaben
PtL	Power-to-Liquid (aus Strom hergestellter flüssiger Kraftstoff)
PtX	Power-to-Liquid oder Power-to-Gas (aus Strom hergestellte flüssige und gasförmige Kraftstoffe)
SAF	Nachhaltige alternative Kraftstoffe
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SOLAS	Internationales Übereinkommen zum Schutz des menschlichen Lebens auf See

1 Einführung

Im Pariser Abkommen, dem Abschlussdokument der Klimakonferenz 2015 in Paris, haben sich die Vertragsparteien des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) darauf geeinigt, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren, um den globalen Temperaturanstieg auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen, und sich zum Ziel gesetzt, ihn unter 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu halten (Artikel 2.1¹). In Artikel 4² einigten sich die Vertragsparteien darauf, die anthropogenen Treibhausgasemissionen und -senken auszugleichen, d. h. in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts Klimaneutralität anzustreben. Da die Emissionen aus dem Luft- und Seeverkehr eindeutig anthropogen sind, fallen sie wie jeder andere Sektor unter die Ziele des Pariser Abkommens, auch wenn sie nicht ausdrücklich erwähnt werden.

Die Klimaneutralität des Luft- und Seeverkehrs kann nur durch umfassende Pakete politischer Instrumente erreicht werden, welche Anreize für Reduktionsmaßnahmen bieten, einschließlich Effizienzsteigerungen durch neue Technologien und verbesserte Abläufe sowie durch eine Reduzierung des Verkehrsaufkommens. Aber selbst, wenn diese Pakete konsequent umgesetzt werden, müssen fossile Brennstoffe durch klimaneutrale Alternativen ersetzt werden, was erst zu direkten Emissionsreduktionen führt.

Im Landverkehr kann die Verwendung fossiler Brennstoffe in Verbrennungsmotoren durch die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom in Elektromotoren ersetzt werden. Im Luft- und Seeverkehr ist es unwahrscheinlich, dass elektrische Antriebe in der für die Dekarbonisierung verbleibenden Zeit die vorherrschende Technologie für lange Strecken werden, da hierfür eine große Energiespeicherkapazität erforderlich ist.

1.1 Herausforderungen

Aus heutiger Sicht werden Verbrennungsmotoren und -turbinen zumindest kurz- und mittelfristig und für eine breite Palette von Anwendungen, die dominierende Antriebstechnologie in der Luft- und Schifffahrt sein. Um in diesen Sektoren Klimaneutralität zu erreichen, müssen postfossile Brennstoffe verwendet werden, die während ihres gesamten Lebenszyklus – von der Quelle bis zum Propeller – keine oder nur sehr geringe Treibhausgasemissionen verursachen. Angesichts des begrenzten Angebots, aber der hohen Nachfrage nach wirklich nachhaltigen Biokraftstoffen, müssen diese postfossilen Kraftstoffe mit Hilfe von erneuerbarer Elektrizität synthetisiert werden. Solche Kraftstoffe werden in der Regel als Elektrokraftstoffe – oder kurz als (synthetische) E-Kraftstoffe – bezeichnet.³ Wir fassen unter dieser Kategorie alle Arten von flüssigen oder gasförmigen synthetischen Kraftstoffen zusammen, die strenge Nachhaltigkeitskriterien erfüllen, wie z. B. E-Ammoniak, E-Diesel, E-Wasserstoff, E-Kerosin, E-Methan und E-Methanol. Die zentralen Fragen sind, wie diese Kraftstoffe in Zukunft in dem erforderlichen Umfang bereitgestellt werden können und wie sichergestellt werden kann, dass in beiden Sektoren nur solche Kraftstoffe verwendet werden.

¹ “Holding the increase in the global average temperature to well below 2 °C above pre-industrial levels and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5 °C above pre-industrial levels”.

² “In order to achieve the long-term temperature goal set out in Article 2, Parties aim ... to achieve a balance between anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases in the second half of this century”.

³ Andere Begriffe für ähnliche Konzepte sind (nachhaltige) alternative Kraftstoffe (SAF), Power-to-Liquids (PtL), Power-to-X (PtX), klimafreundliche Kraftstoffe, kohlenstoffarme Kraftstoffe, klimaneutrale Kraftstoffe, nachhaltig erzeugte Elektrokraftstoffe usw. Wir haben uns bemüht, die Terminologie so weit wie möglich zu harmonisieren. Bei Zitaten oder Verweisen auf andere Studien ist es jedoch oft sinnvoller, die dort verwendete Terminologie beizubehalten.

Das übergeordnete Ziel dieser Studie ist es, politische Roadmaps zu Optionen für eine klimaneutrale Energieversorgung des Luft- und Seeverkehrs zu entwickeln, welche die Beiträge beider Sektoren zur Erreichung der globalen, europäischen und nationalen Klimaziele sicherstellen könnten. Darüber hinaus werden politische Instrumente und technologische Maßnahmen vorgeschlagen, die darauf abzielen E-Fuels zur Marktreife zu bringen.

1.2 Schwerpunkt und Umfang

Im Einklang mit dem Ziel Deutschlands und Europas, bis spätestens 2050 klimaneutral zu werden, sollen auch der Luft- und der Seeverkehr bis dahin klimaneutral werden. Dementsprechend sind die Roadmaps für den Übergang zu postfossilen Energieträgern viel ehrgeiziger als derzeit auf internationaler Ebene vorgesehen. Die Internationale Zivilluftfahrt-Organisation (ICAO) hat einen Maßnahmenkatalog verabschiedet, um zwischen 2021 und 2035 ein klimaneutrales Wachstum zu erreichen, und eine Arbeitsgruppe arbeitet Vorschläge aus, um auf der nächsten Versammlung im Jahr 2022 ein langfristiges Ziel zu verabschieden. Ein langfristiges Ziel für die Klimaneutralität des Sektors hat die ICAO demnach nicht. Die Internationale Seeschiffahrtsorganisation (IMO) plant zur Verringerung der Treibhausgasemissionen, die jährlichen Emissionen bis 2050 um mindestens 50% unter das Niveau von 2008 zu senken und die Treibhausgasemissionen so bald wie möglich in diesem Jahrhundert abzubauen. Die nachstehend beschriebenen Roadmaps zeigen Wege auf, wie die Klimaneutralität oder zumindest die Kohlenstoffneutralität beider Sektoren bis 2050 erreicht werden kann, um auf einem Pfad zu bleiben, der mit dem Temperaturziel des Pariser Abkommens im Einklang steht.

Derzeit werden fast 100% des Luft- und Seeverkehrs durch fossile Brennstoffe angetrieben. Dies wird sich ändern müssen, um die Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen. Fähren und der Kurzstreckenseeverkehr könnten mit batterieelektrischen oder Wasserstoff-Antriebssystemen fahren, wie einige Pilotprojekte zeigen. Auch Kurz- und möglicherweise Mittelstreckenflüge könnten irgendwann mit batterieelektrischen oder wasserstoffbetriebenen Motoren fliegen. Langstrecken- und Interkontinentalverkehr bleiben jedoch in beiden Sektoren eine Herausforderung. Aufgrund des hohen Energiebedarfs auf diesen Strecken dürften batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Antriebe aufgrund ihrer im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen viel geringeren Energiedichte, sowohl in Bezug auf das Gewicht als auch auf das Volumen, keine praktikablen Lösungen darstellen. Daher werden beide Märkte in Bezug auf Kraftstoffarten und Antriebstechnologien stärker segmentiert sein als heute. Die Betreiber werden wahrscheinlich auf Kurz- und Langstrecken unterschiedliche Kraftstoffantriebssysteme einsetzen. Da die Lösungen für Kurzstrecken anders sind als für Langstrecken, können sie getrennt betrachtet werden. Da Langstreckenverkehr den größten Anteil an den Emissionen hat, konzentrieren wir uns auf Optionen für Interkontinentalflüge und die Hochseeschifffahrt und vernachlässigen andere Marktsegmente weitgehend, es sei denn, ihre Lösungen bieten Synergien für das Langstreckensegment.

Neben synthetischen E-Kraftstoffen sind nachhaltige Biokraftstoffe eine weitere Option zur Verringerung der Treibhausgasemissionen des Luft- und Seeverkehrs. Sie sind bereits verfügbar, allerdings zu deutlich höheren Preisen als fossile Kraftstoffe und das Potenzial für wirklich nachhaltige Biokraftstoffe ist sehr begrenzt. Zwar könnten die Preise aufgrund von Skaleneffekten sinken, wenn ihre Verwendung weiter gefördert würde, doch stehen sie vor zusätzlichen Herausforderungen, die ihre Durchführbarkeit als langfristige Lösung in Frage stellen: Wenn sie aus nachhaltiger Biomasse (aus Reststoffen oder aus dem Anbau) hergestellt werden, ist ihr Massenpotenzial aufgrund des viel höheren Flächenbedarfs als bei der Produktion von synthetischen E-Kraftstoffen sehr begrenzt. Darüber hinaus können sie durch direkte oder indirekte Landnutzungsänderungen zusätzliche Treibhausgasemissionen verursachen und in direktem Wettbewerb mit der Nahrungsmittelproduktion (Kraftstoffe oder Nahrungsmittel) stehen. Trotz

dieser Risiken können sie zu einer kurzfristigen Verringerung der Treibhausgasemissionen beitragen. Da es jedoch unwahrscheinlich ist, dass sie eine langfristige Lösung für den Luft- und Seeverkehr darstellen, beziehen wir nachhaltige Biokraftstoffe nicht in unsere Studie mit ein.

Selbst wenn die Treibhausgasemissionen auf Null reduziert werden, sind der Luft- und der Seeverkehr aufgrund ihrer Nicht-CO₂-Klimaauswirkungen, insbesondere ihrer Auswirkungen auf die Bewölkung, möglicherweise immer noch nicht klimaneutral. Die Defossilisierung der Energieversorgung ist ein notwendiger Schritt zur Klimaneutralität, reicht aber allein nicht aus. E-Fuels können synthetisch hergestellt werden, um die Nicht-CO₂-Auswirkungen zu reduzieren, aber es sind zusätzliche politische Maßnahmen erforderlich, um die Nicht-CO₂-Auswirkungen so gut wie möglich zu eliminieren. Der Umfang dieser Studie beschränkt sich auf die Treibhausgasemissionen von fossilen und synthetischen E-Kraftstoffen. Sie befasst sich nicht mit den ergänzenden Politiken und Maßnahmen zur Bekämpfung der Nicht-CO₂-Auswirkungen.

Da die meisten Prognosen und Analysen, auf die in dieser Studie Bezug genommen wird, vor dem Ausbruch der Covid-19-Pandemie erstellt wurden, berücksichtigen sie nicht die Auswirkungen der Pandemie. Sie ist zwar noch nicht vorbei, aber es ist bereits klar, dass ihre Auswirkungen schwerwiegend und beispiellos sind. Die Prognosen müssen nach unten korrigiert werden, insbesondere für den Luftfahrtsektor. In der Schifffahrt werden die mittelfristigen Auswirkungen von der Erholung der Weltwirtschaft abhängen. Es scheint, dass der Seeverkehr weniger betroffen ist als der Luftverkehr, vor allem weil hier mehr Fracht als Passagiere befördert wird. Außerdem hat die Pandemie gezeigt, dass ein Teil des Verkehrs vermieden werden kann, z. B. Geschäftsflüge, die durch Videokonferenzen ersetzt wurden oder Freizeitreisen, weil Urlaubsziele in unmittelbarer Nähe, die ohne Flug erreichbar sind, an Attraktivität gewonnen haben. Einige dieser Veränderungen könnten auch nach dem Ende der Krise fortbestehen, so dass die Wachstumsraten der Luftverkehrsnachfrage niedriger sein könnten als vor der Covid-19-Pandemie. Ein Ende der Pandemie ist jedoch noch nicht abzusehen, und auch die künftige Entwicklung der beiden Sektoren nach der Krise ist nicht klar. Bis dahin bilden die derzeit verfügbaren Projektionen immer noch die zuverlässigste Grundlage für die Gestaltung von Maßnahmen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen und die Analyse ihrer möglichen Auswirkungen.

Im Juli 2021 legte die Kommission der Europäischen Union (EU) das sogenannte "Fit-for-55-Paket" vor,⁴ das mehrere Vorschläge für Richtlinien und Verordnungen enthält, die darauf abzielen die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55% im Vergleich zu 1990 zu senken. Das Paket umfasst auch zwei Dossiers, welche die Einführung nachhaltiger Kraftstoffe im Luft- und Seeverkehr beschleunigen sollen (ReFuelEU Aviation⁵, FuelEU Maritime⁶). Diese Dossiers ähneln in gewissem Maße den in den nachstehenden Roadmaps vorgeschlagenen Maßnahmen. Die Dossiers werden vom Europäischen Parlament geprüft und möglicherweise abgeändert und könnten im Trilog verhandelt werden, falls der Europäische Rat dem Vorschlag der Kommission und den Abänderungen des Parlaments nicht zustimmt. Da dieser Prozess mehrere Monate dauern kann, können die in diesem Papier angestellten Überlegungen zur Diskussion in den verschiedenen europäischen Gremien beitragen.

⁴ Europäischer Green Deal: Kommission schlägt Umgestaltung der EU-Wirtschaft und -Gesellschaft vor, um Klimaziele zu erreichen, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_3541.

⁵ Europäische Kommission, KOM(2021) 561 endgültig, Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gewährleistung gleicher Ausgangsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr, https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/refueleu_aviation_-_sustainable_aviation_fuels.pdf.

⁶ Europäische Kommission, KOM(2021) 562 endgültig, Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über die Verwendung von erneuerbaren und kohlenstoffarmen Kraftstoffen im Seeverkehr, https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/fueleu_maritime_-_green_european_maritime_space.pdf.

1.3 Struktur

Dieses Strategiepapier fasst eine komplette Analyse der Optionen zusammen, um langfristig Klimaneutralität im Luft- und Seeverkehr zu erreichen.⁷ Der Schwerpunkt dieses Papiers liegt auf Strategien zur Klimaneutralität im Seeverkehr. Ein ähnliches Strategiepapier behandelt Strategien für den Luftverkehr.⁸

In Kapitel 2 geben wir einen synoptischen Überblick über Szenarien für die Entwicklung der Verkehrsleistung, des impliziten Endenergiebedarfs und der daraus resultierenden Treibhausgasemissionen, um die für die Defossilisierung des Seeverkehrs erforderliche Menge an erneuerbaren Energien abzuschätzen. In einem zweiten Schritt bewerten wir die Handlungsfelder, die zur Ermöglichung des Übergangs "beackert" werden müssen. Darüber hinaus analysieren wir in Kapitel 3 die Hindernisse für die Einführung von E-Fuels und mögliche Maßnahmen zu deren Überwindung. Die technologischen Herausforderungen und Potenziale für die Herstellung der postfossilen Kraftstoffe werden in Kapitel 4 erörtert. Auf der Grundlage der vorangegangenen Kapitel beschreiben wir in Kapitel 5 mögliche Roadmaps für den Übergang zur Klima- oder zumindest zur Kohlenstoffneutralität. Schließlich ziehen wir in Kapitel 6 allgemeine Schlussfolgerungen und geben konkrete politische Empfehlungen.

2 Energiebedarf

Die IMO hat im April 2018 eine erste Strategie zur Verringerung der Treibhausgasemissionen von Schiffen (MEPC 72/17/Add.1) verabschiedet, die 2023 abgeschlossen werden soll. Damit verstärkt die IMO ihren Beitrag zu den globalen Bemühungen die Treibhausgasemissionen des internationalen Seeverkehrs anzugehen und entsprechende Aktionen und Maßnahmen festzulegen. Die ursprüngliche Strategie der IMO hat zwei Hauptziele festgelegt. Erstens sollen die THG-Emissionen des internationalen Seeverkehrs so schnell wie möglich ihren Höchststand erreichen und die gesamten jährlichen THG-Emissionen bis 2050 um mindestens 50% im Vergleich zu 2008 gesenkt werden, wobei die Bemühungen um einen schrittweisen Ausstieg im Einklang mit dem Temperaturziel des Pariser Abkommens fortgesetzt werden sollen. Zweitens sollte die durchschnittliche Kohlenstoffintensität des Sektors, definiert als CO₂-Emissionen pro Verkehrsleistung, bis 2030 um mindestens 40% gegenüber 2008 gesenkt werden, wobei die Anstrengungen in Richtung 70% bis 2050 fortgesetzt werden sollten. Diese ehrgeizigen Ziele sind das Ergebnis von Verhandlungen, in denen sich die EU-Mitgliedstaaten, darunter auch Deutschland, für eine 70- bis 100-prozentige Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 gegenüber 2008 ausgesprochen haben, um die Reduktionsziele für den internationalen Seeverkehr mit dem Temperaturziel des Pariser Abkommens in Einklang zu bringen.

Die derzeit verfügbaren technischen und betrieblichen Maßnahmen zur Verringerung der THG-Emissionen werden jedoch nicht ausreichen, um die gesamten jährlichen THG-Emissionen der internationalen Seeschifffahrt bis 2050 schrittweise zu reduzieren. Eine der vielversprechendsten Optionen, um die Lücke auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität des Sektors zu schließen, ist die Verwendung postfossiler Kraftstoffe, die keine direkten oder indirekten fossilen Treibhausgasemissionen verursachen. Doch wie viel Energie wäre erforderlich, um den künftigen Bedarf des Seeverkehrs zu decken?

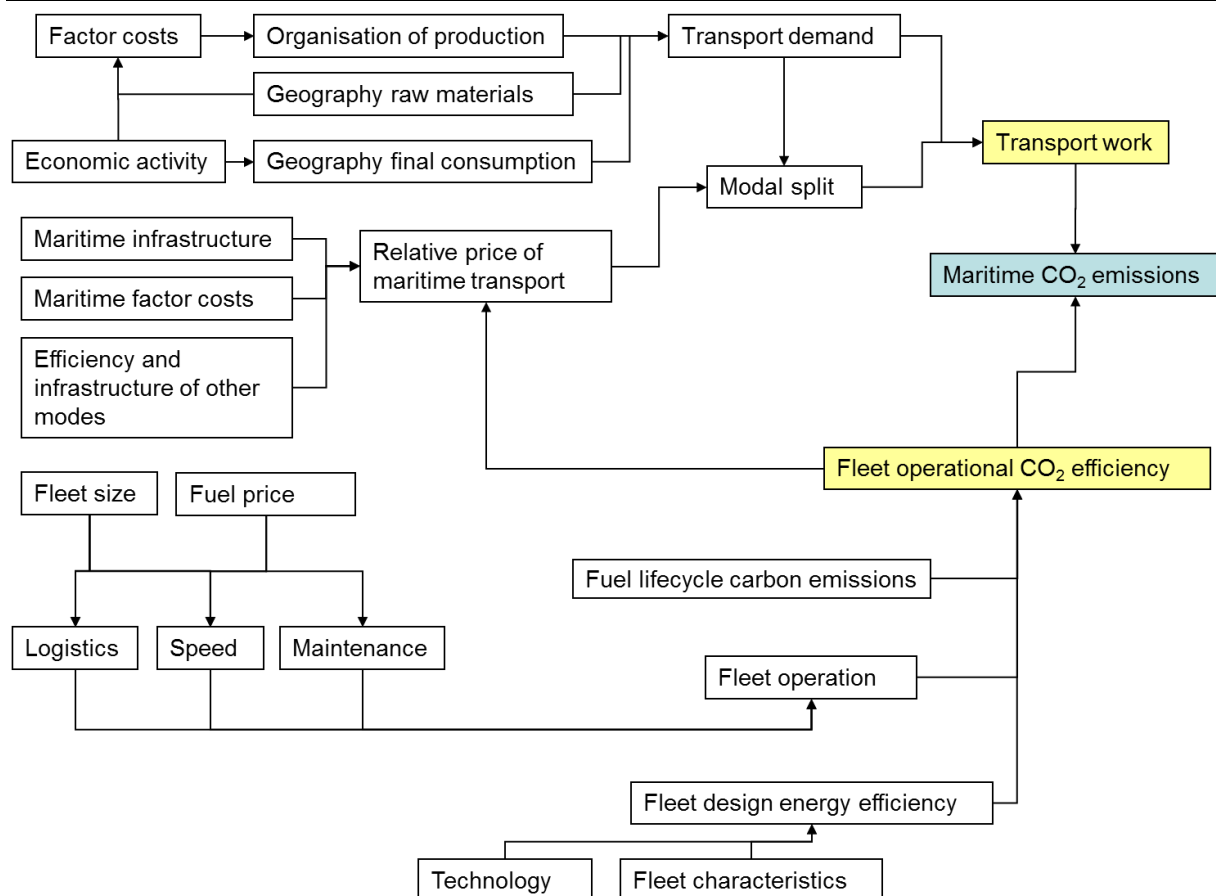
⁷ Umweltbundesamt 2021: Klimaschutz im Luft- und Seeverkehr.

⁸ Umweltbundesamt 2021: Klimaschutz im Luft- und Seeverkehr: Strategiepapier Luftfahrt.

2.1 Determinanten der Energienachfrage und der CO₂-Emissionen

Wie in Abbildung 1 dargestellt, werden der Energiebedarf und die CO₂-Emissionen der internationalen Seeschifffahrt von vielen verschiedenen Faktoren bestimmt, wobei die betriebliche CO₂-Effizienz der Flotte und die Transportleistung, die beiden wichtigsten direkten Determinanten sind.

Abbildung 1: Faktoren, welche die CO₂-Emissionen des Seeverkehrs bestimmen



Quelle: IMO (2009)

Die Projektionen für den Energiebedarf des Sektors konzentrieren sich daher auf die Bestimmung dieser beiden Faktoren. Bei den CO₂-Emissionen der Flotte wird zusätzlich die Kohlenstoffintensität der Energienachfrage berücksichtigt.

Wichtige Faktoren, welche die betriebliche Energieeffizienz der künftigen Flotte bestimmen, sind das Potenzial und die Kosten von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung, Markt Hindernisse für die Einführung dieser Maßnahmen, Bunkertreibstoffpreise und Energieeffizienzvorschriften.

In Studien zu Energiebedarfsprojektionen, die in dieser Analyse berücksichtigt wurden, werden die Potenziale und Kosten von Effizienzsteigerungsmaßnahmen durch Grenzvermeidungskostenkurven, die Marktbarrieren durch Marktbarrierefaktoren (die den Anteil kosteneffizienter Maßnahmen angeben, die aufgrund der Barriere nicht angenommen werden) und die Bunkertreibstoffpreise durch verschiedene Preisszenarien erfasst. In den Business-as-Usual (BAU)-Szenarien wird die derzeitige Regulierung widerspiegelt; in den Reduktionsszenarien werden die erwarteten Auswirkungen der derzeitigen und zusätzlichen zukünftigen Regulierung erfasst.

2.2 Prognosen zum Energiebedarf und zu den CO₂-Emissionen

Bei der Analyse des Energiebedarfs und der CO₂-Emissionsprognosen für die internationale Seeschifffahrt wurde eine Reihe neuerer Studien berücksichtigt: IMO 2020; CE Delft 2019; DNV GL 2017a; 2017b.⁹ Der Schwerpunkt liegt auf "2°C-Welt"-Szenarien, in denen der künftige Transportbedarf der Seeschifffahrt unter der Annahme ermittelt wird, dass das globale 2°C-Ziel wahrscheinlich erreicht wird.

Für diese "2°C-Welt"-Szenarien wird der Energiebedarf im Jahr 2050 voraussichtlich zwischen 14 und 19 EJ in den BAU-Szenarien und zwischen 10 und 16 EJ in den Reduktionsszenarien liegen (Tabelle 1). Dies entspricht einem Anstieg von 15% bis 59% im Vergleich zu 2008 in den BAU-Szenarien und einer Spanne von 16% Rückgang bis 33% Anstieg der Energienachfrage im Jahr 2050 in den Reduktionsszenarien im Vergleich zu 2008.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Energiebedarfs- und CO₂-Emissionsprognosen

2°C-Welt"-Szenarien	BAU-Szenarien	Reduktionsszenarien
Prognosen für den Energiebedarf 2050	14 - 19 EJ (+15 - +59% im Vergleich zu 2008)	10 - 16 EJ (-16 - +33% im Vergleich zu 2008)
CO ₂ -Emissionsprojektionen für 2050	990 - 1 720 Mt (+5 - +82% im Vergleich zu 2008)	490 - 1 220 Mt (-48 - +30% im Vergleich zu 2008)

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die CO₂-Emissionsprojektionen weichen aus zwei Gründen von den Energiebedarfsprojektionen ab. Erstens wurden mehr CO₂-Emissionsprojektionen als Energienachfrageprojektionen veröffentlicht, was zur Folge hat, dass die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar sind. Zweitens wird in einigen Szenarien davon ausgegangen, dass sich die Kohlenstoffintensität des Sektors in Bezug auf die CO₂-Emissionen pro Einheit des Energiebedarfs im Laufe der Zeit verbessert, z. B. durch den Einsatz alternativer Brennstoffe. Der Anstieg der CO₂-Emissionen bis 2050 gegenüber dem Stand von 2008, könnte daher geringer ausfallen als der Anstieg der Energienachfrage bis 2050.

Für diese "2°C-Welt"-Szenarien ergibt sich, dass die CO₂-Emissionen des internationalen Seeverkehrs im Jahr 2050 in den BAU-Szenarien zwischen 990 und 1 720 Mio. t und in den Reduzierungsszenarien zwischen 490 und 1 220 Mio. t liegen dürften (Tabelle 1). Dies entspricht einem Anstieg von 5 bis 82% gegenüber 2008 im BAU-Szenario und stellt im Vergleich zu 2008 eine Spanne von 48% Rückgang bis 30% Anstieg der CO₂-Emissionen im Jahr 2050 im Reduktionsszenario dar.

Daraus lässt sich schließen, dass im optimistischsten Szenario die gesamten jährlichen CO₂-Emissionen bis 2050 im Vergleich zu 2008 um fast 50% reduziert werden. Allerdings wurde in

⁹ DNV GL (2020) bietet ebenfalls neuere CO₂-Projektionen für die Seeschifffahrt. Sie unterscheiden dreißig Szenarien mit drei verschiedenen Ambitionsniveaus (keine Ambition/IMO-Ambition/Defossilisierung bis 2040), zwei verschiedenen Wachstumsniveaus (niedrig/hoch) und drei Kraftstoffpreisszenarien (niedriger Biomassepreis/niedriger Strompreis/niedriger blauer und fossiler Preis). Die entsprechenden CO₂-Projektionen werden jedoch nur grafisch dargestellt, und der tatsächliche Energiebedarf des Sektors in absoluten Zahlen wird für die verschiedenen Szenarien und Pfade nicht angegeben; stattdessen wird eine Spanne des Energiebedarfs für 2050 für alle Szenarien mit geringem Wachstum (10,5-11,0 EJ) und alle Szenarien mit hohem Wachstum (23,5-24,6 EJ) angegeben. Da wir den Energiebedarf nicht den Szenarien mit bestimmten Ambitionsniveaus zuordnen können, haben wir diese Studie nicht berücksichtigt.

diesem Szenario die Möglichkeit der Nutzung alternativer Kraftstoffe bereits berücksichtigt (DNV GL 2017b). Das optimistischste "2°C-Welt"-Szenario, bei dem die Verwendung alternativer Brennstoffe nicht berücksichtigt wurde, führt zu einem Rückgang der CO₂-Emissionen im Jahr 2050 um ca. 18% gegenüber 2008. Die verbleibende Reduzierung um 32% (ca. 305 Mio. t) müsste durch innovative Maßnahmen, einschließlich postfossiler Brennstoffe, erreicht werden. Wenn die verbleibende Reduktion in diesem optimistischsten Reduktionsszenario nur durch postfossile Brennstoffe erreicht werden soll, wären ca. 4 EJ postfossiler Brennstoffe erforderlich, um das Ziel einer 50%igen Emissionsreduktion zu erreichen. Um das Emissionsminderungsziel von 70-100% zu erreichen, wären 6,5 bis 10,2 EJ an postfossilen Brennstoffen erforderlich.

Zum Vergleich für Deutschland: Für die national induzierte internationale Schifffahrt wurde geschätzt, dass von einem Entwicklungspfad hin zu einem ressourceneffizienten und treibhausgasneutralen Deutschland bis 2050 ca. 0,036-0,054 EJ an Power-to-Liquids (PtL)-Kraftstoffen vom Sektor benötigt würden (UBA 2019a).

3 Handlungsfelder

Im Gegensatz zum Luftverkehr ist in der Seeschifffahrt der Einsatz verschiedener postfossiler Brennstoffe denkbar. Dafür gibt es zwei Hauptgründe: Erstens ist die Seeschifffahrtsflotte in Bezug auf Schiffstypen und -größen sowie deren Betriebsprofile sehr viel heterogener. Zweitens werden aufgrund der Luftqualitätsvorschriften und der Heterogenität des Sektors derzeit verschiedene Bunkertreibstofftypen verwendet (HFO, MGO, LNG, Methanol, LPG, Ethan), und weitere Bunkertreibstofftypen (DME, Ethanol) werden erprobt bzw. in Betracht gezogen. Dies hat zu einer Vielzahl von Motoren geführt, die bereits eingesetzt werden oder sich in der Entwicklung befinden sowie zur Entwicklung von Motoren, die eine Kraftstoffflexibilität ermöglichen. Im Prinzip könnten alle diese Bunkerkraftstoffarten als E-Kraftstoffe hergestellt und verwendet werden, um den Seeverkehrssektor zu dekarbonisieren. Darüber hinaus werden auch die Verwendung von Wasserstoff und anderen Wasserstoffträgern wie Ammoniak in Verbrennungsmotoren (ICE) sowie der Einsatz von Brennstoffzellen als Optionen zur Dekarbonisierung des Sektors in Betracht gezogen.

3.1 Barrieren

Ein führender postfossiler Kraftstofftyp hat sich bisher nicht herauskristallisiert und aufgrund der Heterogenität des Sektors ist auch davon auszugehen, dass sich nicht nur ein einziger Kraftstofftyp durchsetzen wird. Die Kraftstoffarten, die noch nicht als E-Fuels für die Schifffahrt zur Verfügung stehen, unterscheiden sich im Wesentlichen durch folgende Merkmale:

1. zu erwartende Bunkerpreise der E-Fuels (inkl. Produktions- und Vertriebskosten), die sich voraussichtlich grundlegend von ihren fossilen Pendanten unterscheiden werden;
2. Kosten (CAPEX und OPEX) und Entwicklungsstand/Verfügbarkeit der entsprechenden Systeme an Bord der Schiffe;
3. Kosten (CAPEX und OPEX) und Entwicklungsstand/Verfügbarkeit der Onshore-Verteilungsinfrastruktur;
4. inwieweit die Kraftstoffe bisher in Vorschriften, Leitlinien und Normen eingebettet sind;
5. volumetrische Energieträgerdichte.

Als Grundlage für die Festlegung, wie die Nutzung postfossiler Kraftstoffe im Seeverkehr am besten gefördert werden kann, ist es wichtig zu analysieren, welche Hindernisse derzeit für die Nutzung der verschiedenen Kraftstoffe bestehen, um Ansatzpunkte für eine gezielte Förderung

zu schaffen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der in dieser Analyse betrachteten E-Kraftstoffe unter dem Aspekt der Sicherheit.

Tabelle 2: Sicherheitsrelevante Merkmale der Kraftstoffe

	HFO	Methanol	Ethanol	DME	Propan	Methan	Wasserstoff	Ammoniak
Selbstentzündungstemperatur [°C]	>400	440	400	240	470	595	560	630
Entflammargrenzen, Gemisch mit Luft [Vol.-%]	1.5-6 (typisch)	6 -50	3.1-27.7	3.4-26.7	2.1-9.5	5-15	4-75	15-33.6
Flammpunkt [°C] ¹⁰	>60 (65-80)	9	12	(-42.2)	(-104)	(-188)	(<-253)	(<-33)
Mindestzündenergie des Gases/Dampfes [MJ]		0.14	0.23	0.15	0.25	0.21	0.016	680
Explosionsgruppe*	IIA	IIA	IIB	IIB	IIA	IIA	IIC	IIA

Anmerkungen: *Die Gefahr steigt von IIA auf IIC.

Quellen: IFA 2021; WHO 2021; Dow 2020; TRIS 2015

Unsere umfassende Analyse der Hemmnisse befasste sich mit den technologischen, wirtschaftlichen und institutionellen/rechtlichen Hemmnissen für die Verwendung der betrachteten E-Kraftstofftypen; außerdem wurden die Hemmnisse für die Verwendung der E-Kraftstoffe auf Schiffen,- für den Transport dieser Kraftstoffe zu den Häfen und die Hemmnisse auf Hafenniveau unterschieden. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Kraftstoffe, wenn sie in der Schifffahrt eingesetzt werden, sowie über die wichtigsten Hindernisse für den Einsatz der Kraftstoffe in der Schifffahrt.

Tabelle 3: Überblick über die wichtigsten Vorteile, Nachteile und Hindernisse bei der Verwendung von Kraftstoffen

E-Kraftstoff-Typ	Vorteile	Nachteile	Haupthindernisse für die Nutzung von E-Kraftstoff
Diesel	<ul style="list-style-type: none"> - Kann von den meisten Schiffen (mit Kompressionszündungsmotoren) ohne erhebliche zusätzliche Kapitalkosten genutzt werden - Versorgungsinfrastruktur leicht verfügbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Wahrscheinlich keine gute Option für Brennstoffzellen - Giftig für Wasserorganismen 	<ul style="list-style-type: none"> - Vorschriften für E-Diesel und Diesel mit niedrigem Flammpunkt noch nicht vollständig entwickelt
Methan	<ul style="list-style-type: none"> - ICE verfügbar und LNG-betriebene Schiffe (500 im Jahr 2020 erwartet) können LNG durch 	<ul style="list-style-type: none"> - Der Platzbedarf der Tanks könnte den Einsatz auf sehr kleinen Schiffen unmöglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Verfügbarkeit der Versorgungsinfrastruktur - Nachbehandlungssysteme

¹⁰ Der Flammpunkt ist definiert als die Temperatur, bei der der Brennstoff genügend Dämpfe erzeugt, um mit Luft an seiner Oberfläche ein zündfähiges Gemisch zu bilden. Der Flammpunkt ist immer niedriger als der Siedepunkt.

E-Kraftstoff-Typ	Vorteile	Nachteile	Haupthindernisse für die Nutzung von E-Kraftstoff
	E-Methan ersetzen	machen. - Der Platzbedarf der Tanks kann zu einem Verlust an Fracht-/Passagierraum führen - Hohe Systemkosten aufgrund der kryogenen Lagerung und sehr hoher Sicherheitsanforderungen - Formaldehydemissionen bei Verwendung von Otto-Motoren - Methanschlupf bei der Produktion, der Lieferkette und der Verbrennung und die damit verbundene globale Erwärmung	me mit Katalysatoren zur Oxidation der Reste von unverbranntem Methan noch nicht verfügbar
Methanol	- ICE verfügbar und es gibt bereits eine kleine Anzahl von mit Methanol betriebenen Schiffen - Keine kryogene Lagerung erforderlich, da bei Umgebungstemperatur flüssig. - Relativ niedrige Systemkosten - Es gibt einige Erfahrungen mit der Verwendung von Methanol in Schiffsbrennstoffzellen. - Regeln und Vorschriften werden bereits entwickelt	- Toxizität für den Menschen - Formaldehyd-Emissionen bei Verwendung von Otto-Motoren - Bestimmte Materialien müssen aufgrund ihrer Korrosivität vermieden werden	- Verfügbarkeit der Versorgungsinfrastruktur - Regeln und Vorschriften derzeit nur teilweise entwickelt
DME	- ICE verfügbar - Erfordert kein Zweistoffsystem	- Hohe Sicherheitsanforderungen aufgrund der extremen Entflammbarkeit - Bestimmte Materialien müssen aufgrund ihrer Korrosivität vermieden werden	- Verfügbarkeit der Versorgungsinfrastruktur - DME nicht in den aktuellen Regeln und Vorschriften enthalten
Propan	- ICE verfügbar - Mehrere Projekte mit grundsätzlicher Zustimmung der großen Klassifikationsgesellschaften laufen derzeit - Flüssiggas wird als Fracht mit Flüssiggastankern transportiert und als Kraftstoff für Kraftfahrzeuge verwendet, so dass man auf Erfahrungen aufbauen kann. - Der Platzbedarf der Tanks ist geringer als bei Methan und Wasserstoff	- Hohe Sicherheitsanforderungen aufgrund der extremen Entflammbarkeit	- Verfügbarkeit der Versorgungsinfrastruktur - LPG ist in den derzeitigen Vorschriften nicht enthalten
Ammoniak	- Kohlenstofffreier Kraftstoff - Geringe Entflammbarkeit macht es relativ sicher in Bezug auf die	- ICE noch in der Entwicklung - Bestimmte Materialien	- Technologische Bereitschaft von ICE - Verfügbarkeit der Versor-

E-Kraftstoff-Typ	Vorteile	Nachteile	Haupthindernisse für die Nutzung von E-Kraftstoff
	<p>Explosivität</p> <ul style="list-style-type: none"> - Der Platzbedarf der Tanks ist geringer als bei Methan und Wasserstoff - Ammoniak wird als Fracht mit Flüssiggastankern transportiert, was bedeutet, dass es Erfahrungen gibt, auf denen man aufbauen kann. 	<p>müssen aufgrund ihrer Korrosivität vermieden werden</p> <ul style="list-style-type: none"> - Toxizität für Menschen und Wasserorganismen - Mittlere Systemkosten aufgrund der Lagerung und hoher Sicherheitsanforderungen (aufgrund der Toxizität) - Relativ hohe NO_x-Emissionen beim Einsatz in Verbrennungsmotoren können eine Nachbehandlung erforderlich machen (EGR oder ein SCR-System, das Ammoniak benötigt, könnten hier eingesetzt werden) - Bei den in der Entwicklung befindlichen Verbrennungsmotoren stellen die CO₂-Stickoxidemissionen eine Herausforderung dar, und die Technologie zur Abgasreinigung ist noch nicht erprobt 	<p>gungsinfrastruktur</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ammoniak ist in den geltenden Vorschriften nicht enthalten
Wasserstoff	<ul style="list-style-type: none"> - Kohlenstofffreier Kraftstoff - Kann in Brennstoffzellen mit geringem Vorverarbeitungsaufwand verwendet werden 	<ul style="list-style-type: none"> - ICE noch nicht verfügbar - Der Platzbedarf der Tanks könnte den Einsatz auf sehr kleinen Schiffen unmöglich machen. - Der Platzbedarf der Tanks kann zu einem Verlust an Fracht-/Passagierraum führen. - Die geringe Energiedichte von LH₂ könnte dazu führen, dass große Schiffe häufiger auftanken müssen; bei Schiffen, die auf relativ kurzen Strecken verkehren (z. B. Fähren), könnte dies jedoch kein Problem darstellen. - Hohe Systemkosten aufgrund der kryogenen Lagerung und sehr hoher Sicherheitsanforderungen - Relativ hohe NO_x-Emissionen bei Verwendung in Verbrennungsmotoren erfordern möglicherweise eine Nachbehandlung 	<ul style="list-style-type: none"> - Technologische Bereitschaft von ICE - Platzbedarf der Tanks - Technologische Bereitschaft der Versorgungsinfrastruktur - Wasserstoff ist in den derzeitigen Vorschriften nicht enthalten

E-Kraftstoff-Typ	Vorteile	Nachteile	Haupthindernisse für die Nutzung von E-Kraftstoff
		- Wenn Wasserstoff entweicht, wird er höchstwahrscheinlich einen kleinen, indirekten Erwärmungseffekt haben, aber das genaue GWP ist noch ungewiss	

Quelle: Eigene Zusammenstellung des Autors

Die Übersicht zeigt, dass alle potenziellen E-Kraftstofftypen bestimmte Vor- und Nachteile haben und dass derzeit keiner der E-Kraftstofftypen als der potenziell dominierende E-Kraftstofftyp in der Zukunft identifiziert werden kann.

3.2 Politische Instrumente

Die potenziellen Instrumente zur Überwindung der Hindernisse lassen sich nach drei verschiedenen Gliedern der Wertschöpfungskette für E-Kraftstoffe unterscheiden:

- ▶ **Forschung und Entwicklung:** Wichtige Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen und großmaßstäbliche Demonstrationsanlagen sind beispielsweise im Bereich der Wasserelektrolyse mit erneuerbarem Strom, der CO₂-Extraktion aus industriellen Prozessen oder der CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre sowie der Entwicklung von Verfahren und Katalysatoren sowohl für die Fischer-Tropsch als auch für die Methanol-Route zur Herstellung von E-Kraftstoffen erforderlich. Alle diese Elemente sind letztlich Kostenfaktoren für die Herstellung von E-Kraftstoffen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass ein Schlüsselement für einen Fortschritt bei der Herstellung/Nutzung von E-Kraftstoffen, die verstärkten Bemühungen um die Erforschung und Entwicklung von Verfahren und deren großtechnische Vermarktung sind. Es scheint realistisch zu sein, dass private Investitionen allein nicht ausreichen werden, um einen beschleunigten Fortschritt bei der Herstellung und Nutzung von E-Kraftstoffen zu erzielen. Staatliche Unterstützung scheint wichtig zu sein, da die Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen im Bereich der E-Kraftstoffe dem Marktversagen unterliegen. Investitionen in F&E durch private Akteure werden als zu risikoreich angesehen; daher werden nicht genügend Mittel in die F&E-Bemühungen investiert.
- ▶ **Produktion:** Eine große Nachfrage erleichtert die Erzielung ausreichender Größenvorteile. Da die Defossilisierung voranschreitet, benötigen viele Sektoren über den Verkehr hinaus Vorprodukte wie die Erzeugung von grünem Wasserstoff oder CO₂ aus der direkten Luftabscheidung. Daher muss der Blickwinkel erweitert werden, da viele Elemente der Energie-, Industrie- und Verkehrspolitik ineinandergreifen und so angepasst werden müssen, dass sie gut zusammenpassen. Das **Problem der Kapitalkosten** könnte vom Staat direkt angegangen werden, z.B. in Form von Kreditbürgschaften für private Investoren. Es könnten auch Zuschüsse zu den Baukosten von Elementen der E-Fuels-Produktionskette gewährt werden, wie im Falle des 10-MW-Elektrolyseurs der Rheinland-Raffinerie, für den die EU die Hälfte der Investitionskosten in Höhe von 20 Mio. € übernahm (FCH 2019). Um das Marktversagen durch den First-Mover-Nachteil zu vermeiden, könnte der Staat **Garantiepreise für E-Fuels** anbieten. Dies würde Rechtssicherheit für Investoren und Anreize für die Produktion von E-Treibstoffen schaffen. Die ökonomische Logik dieses Instruments wurde bei der Schaffung des deutschen Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) angewandt, das Investoren Anreize für

Investitionen in die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bot. Dies war besonders wichtig, als die Windenergie und die Fotovoltaik aufkamen, aber immer noch einen relativ hohen Kostennachteil gegenüber der konventionellen Stromerzeugung hatten. Schließlich sollte auch die **internationale Dimension** der E-Fuels-Produktion berücksichtigt werden. Da die Energiekosten ein wesentlicher Faktor für die Kosten von E-Kraftstoffen sein werden, sollte der Standort der E-Kraftstoff-Produktionskette oder von Teilen davon unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit betrachtet werden. Dies könnte zu Produktionsstandorten führen, z. B. im "Sonnengürtel" des Äquators, wo die photovoltaische Stromerzeugung günstig ist, und/oder an Orten mit einer besonderen Effizienz für Windkraft oder geothermische Energie. Daher kann sich die Produktion von E-Fuels auch günstig auf die wirtschaftliche Entwicklung von Ländern mit einem hohen Potenzial an erneuerbaren Energien auswirken. Kooperationsprojekte in dieser Richtung könnten sich nicht nur für die Entwicklungsländer, sondern auch für die Energieverbraucher in den Industrieländern positiv auswirken.

- **Nutzung:** Ein wichtiger Hebel ist die **Verringerung des Preisunterschieds zwischen** herkömmlichen Kraftstoffen und E-Kraftstoffen für die Nutzer. Selbst unter günstigen Bedingungen dürften die künftigen Produktionskosten für E-Kraftstoffe höher sein als die Kosten für konventionelle Kraftstoffe. Eine mögliche Politik könnte darin bestehen, die Kosten der CO₂-Emissionen bei der Verwendung konventioneller Kraftstoffe zu erhöhen, während die Nutzer von Steuern, Abgaben oder Emissionszertifikaten für den Teil des Kraftstoffverbrauchs befreit werden, der aus E-Kraftstoffen stammt. Ein weiteres wirksames politisches Instrument wäre die Einführung einer **obligatorischen Beimischungsquote**. Eine obligatorische Beimischungsquote könnte als wirksame Maßnahme zur Förderung der Verwendung von E-Kraftstoffen angesehen werden. Auch im Hinblick auf die dynamische Effizienz könnte eine Beimischungsquote als Präferenz angesehen werden: Durch eine im Voraus festzulegende obligatorische Quote wird allen potenziellen Investoren auf dem Markt für E-Kraftstoffe signalisiert, dass es effizient ist, kosteneffiziente Produktionsprozesse und Massenproduktionsanlagen zu entwickeln. Darüber hinaus könnte ein Wettbewerb um das kosteneffizienteste Produktionsverfahren ausgelöst werden, wenn die Beimischungsquote auf die Verringerung der CO₂-Emissionen zugeschnitten ist und es dem Markt überlassen bleibt, den besten Weg und das beste Produktionsverfahren zur Erreichung dieses Ziels zu entwickeln. Ein weiteres politisches Instrument, das als Anreiz für die Verwendung von E-Kraftstoffen eingesetzt werden könnte, ist die Einführung von grünen Zertifikaten. Grüne Zertifikate könnten nachweisen, dass irgendwo im Erfassungsbereich ein bestimmter Anteil an E-Kraftstoffen verwendet wird, erfordern aber nicht unbedingt, dass der Inhaber der Zertifikate die E-Kraftstoffe direkt für seinen eigenen Betrieb verwendet. Der Hauptvorteil der Verwendung **grüner Zertifikate** besteht also darin, dass die physische Verwendung von E-Kraftstoffen und die finanzielle Unterstützung für die Herstellung/Verwendung von E-Kraftstoffen getrennt werden. Somit können alle logistischen Probleme bei der Bereitstellung der richtigen Menge an E-Treibstoffen an allen Flughäfen zu jeder Zeit überwunden werden. Generell scheint ein System mit grünen Zertifikaten aus mehreren Gründen vorteilhaft zu sein (Umverteilung der Finanzmittel auf die Nutzer/Hersteller von E-Kraftstoffen, Überwindung der logistischen Probleme einer einheitlichen Beimischungsquote, Möglichkeit einer schrittweisen Einführung usw.).

Jedes Glied der Wertschöpfungskette ist mit besonderen Herausforderungen verbunden. Die politischen Instrumente für die verschiedenen Ebenen sind miteinander verknüpft und sollten schrittweise eingesetzt werden. So könnte es beispielsweise relativ ineffizient sein, Anreize für die Verwendung von E-Kraftstoffen in einem frühen Stadium zu schaffen, wenn die Herausforde-

rungen in Bezug auf Verfahren und Anlagen für die großtechnische Produktion noch ungelöst sind. In Anbetracht des begrenzten Zeitrahmens für die Dekarbonisierung des Luft- und Seeverkehrs muss jedoch möglicherweise ein gewisses Maß an Ineffizienz in Kauf genommen werden, um einen angemessenen Beitrag dieser Sektoren zu den globalen Bemühungen um eine Verringerung der Treibhausgasemissionen zu gewährleisten.

4 Optionen für die postfossile Energieversorgung

Trotz der Tatsache, dass viele der für die Erzeugung von E-Kraftstoffen erforderlichen Prozessschritte bereits zu Beginn des letzten Jahrhunderts erfunden wurden und einige sogar im industriellen Maßstab angewendet werden, steckt die Produktion von E-Kraftstoffen noch in den Kinderschuhen. In diesem Abschnitt werden der derzeitige Stand der Produktionsketten für E-Kraftstoffe, die angestrebten Perspektiven und die Überlegungen, wie sichergestellt werden kann, dass sie tatsächlich zur Verringerung der Treibhausgasemissionen beitragen, erörtert.

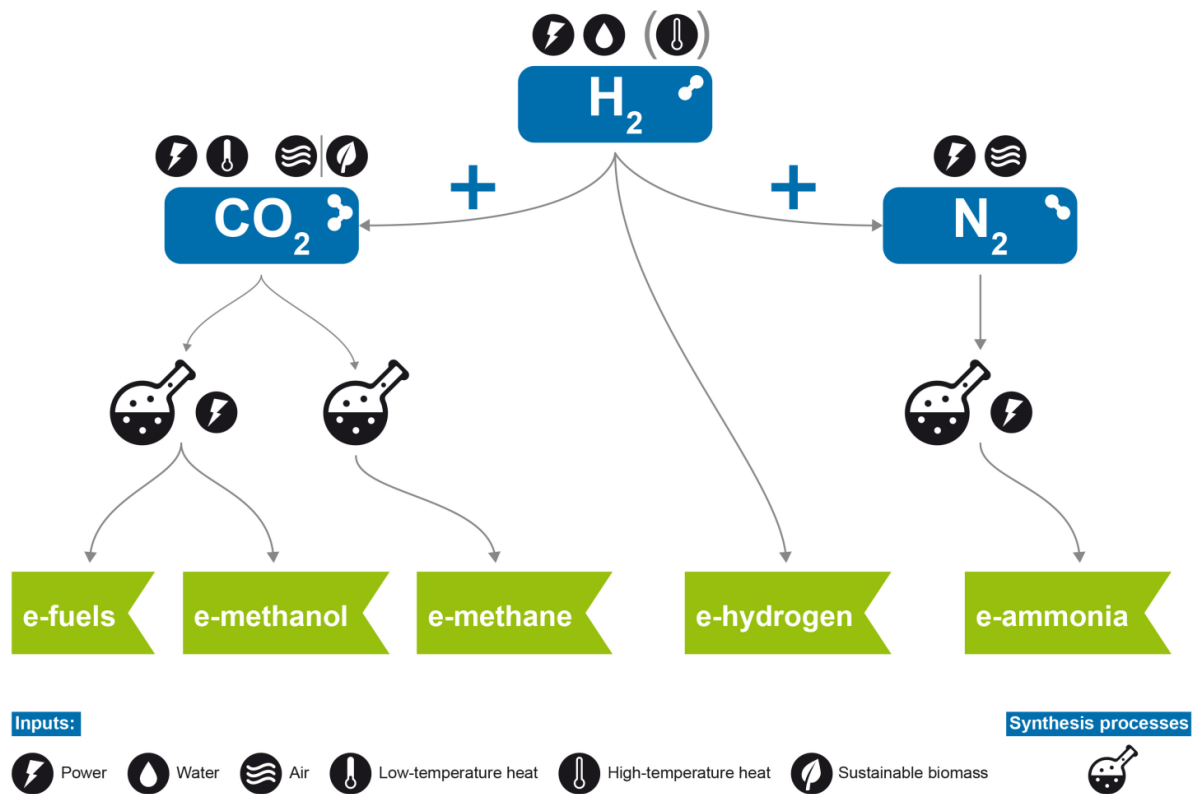
4.1 Technischer und marktbezogener Status quo

Die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse ist ein zentraler (Teil-)Prozess aller Verfahren zur Herstellung von E-Kraftstoffen. Dabei wird Wasser durch Zufuhr von elektrischer Energie elektrochemisch in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Heute werden Elektrolyseure im MW-Bereich in halbmanueller Produktion hergestellt; zunächst müsste eine automatisierte Produktion für Elektrolyseure etabliert werden, um die Technologie zu skalieren und den Markt für die Technologie zu entwickeln. Der derzeitige Weltmarkt für Elektrolyseure ist dementsprechend klein: IEA (2021) schätzt den Weltmarkt für neue Elektrolyseure auf weniger als 500 MW pro Jahr.

Der durch Elektrolyse erzeugte Wasserstoff kann bei Bedarf für den Transport verflüssigt werden. Technisch gesehen ist die Verflüssigung ein etabliertes Verfahren. Die Infrastruktur für die Verteilung und die Antriebs-/Speichertechnik auf Schiffen für die Nutzung von Wasserstoff ist jedoch noch nicht vorhanden.

Eine weitere Möglichkeit der Nutzung von Wasserstoff ist die Synthese von Wasserstoff und CO₂ oder Stickstoff zu Kohlenwasserstoffen oder Ammoniak (Abbildung 2). Die Abtrennung von Stickstoff aus der Umgebungsluft ist das Standardverfahren für die Ammoniakproduktion, ebenso wie das Haber-Bosch-Verfahren (Ammoniaksynthese), die beide im industriellen Maßstab angewendet werden. Für die Herstellung von E-Ammoniak müsste "nur" fossiler Wasserstoff durch Wasserstoff aus Strom ersetzt werden, um diese Art von E-Kraftstoff zu erzeugen.

Abbildung 2: Produktionsschritte für verschiedene E-Kraftstoffe



Anmerkungen: Der Begriff E-Kraftstoffe steht in dieser Abbildung für alle flüssigen Kohlenwasserstoff-E-Kraftstoffe.

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Der Stand der Technik bei der Herstellung von postfossilen E-Kohlenwasserstoffen hat ein anderes Niveau erreicht. Für eine treibhausgasneutrale Herstellung der Kohlenwasserstoffprodukte wird der größte Teil des in den Kraftstoffsyntheseprozessen verwendeten CO₂ aus der Umgebungsluft stammen.¹¹ Dementsprechend wird nur CO₂ aus Prozessen mit nachhaltiger Biomassennutzung (indirekter Kohlenstoffkreislauf) oder direkt aus der Umgebungsluft in relevanten Mengen für die postfossile Kohlenwasserstoffproduktion zur Verfügung stehen, wenn die weltweite Nachfrage nach E-Kraftstoffen steigt. Die Abtrennung von CO₂ aus Abgasströmen biogener Industrieprozesse ist eine verfügbare Standardtechnologie, die einen eher geringen Energieeinsatz erfordert (ifeu 2019). Trotz erheblicher technologischer Fortschritte ist die CO₂-Abscheidung aus der Luft nach wie vor nur im Demonstrationsstadium und mit recht hohen Kosten verbunden.

Unsere Analyse deutet eindeutig darauf hin, dass E-Kraftstoffe noch keinen relevanten Marktanteil haben und die Produktion noch auf den industriellen Maßstab hochgefahren werden muss. Dies liegt vor allem an den hohen Kosten und daran, dass Schiffe, Flugzeuge und Infrastrukturen für die Nutzung dieser Kraftstoffe nicht ausgerüstet sind. Die Voraussetzung für die großtechnische Produktion von E-Kraftstoffen ist der Übergang von der halbmanuellen Produktion von Elektrolyseuren zur vollständigen Automatisierung, um die Produktionskapazitäten für Elektrolyseure zu erhöhen. E-Wasserstoff und E-Ammoniak scheinen die technisch am weitesten fortgeschrittenen Produktionswege der möglichen E-Kraftstoffoptionen im Luft- und Seeverkehr zu

¹¹ CO₂ kann auch aus anderen natürlichen Quellen stammen, um als klimaneutral zu gelten. Diese Option wird in Abschnitt 4.3 ausführlicher erläutert, ebenso wie die viel diskutierte Nutzung fossiler CO₂-Emissionen.

sein. Dies liegt daran, dass für die Herstellung dieser beiden Energieversorgungsoptionen außer der Substitution von fossilem Wasserstoff keine neuen Technologien erforderlich sind.

Alle Endprodukte, die Kohlenstoff benötigen, stehen vor der Herausforderung, eine klimafreundliche Kohlenstoffquelle im relevanten Maßstab zur Verfügung zu haben. Da die CO₂-Abtrennung aus der Umgebungsluft nur in geringem Umfang existiert und Prozesse auf Basis biogener Rohstoffe nur vergleichsweise geringe Mengen an CO₂ liefern, sind der Ausbaugeschwindigkeit und der Skalierung der Anlagengrößen Grenzen gesetzt. Aus Gründen der Kostendegression müssen alle Verfahren außer der Ammoniakproduktion noch über mehrere Entwicklungsstufen zu großtechnischen Anlagen ausgebaut werden. Zeitkonstanten für die Skalierung der Technologie, aber auch für die Planung und Genehmigung von Neuanlagen begrenzen die kurz- und mittelfristige Verfügbarkeit von Brennstoffen für die meisten Brennstoffoptionen. Es wird erwartet, dass die ersten Großanlagen im Zeitraum 2028-2030 in Betrieb genommen werden können (NPM, AG 1 2020).

Tabelle 4: Vergleich des technischen Stands und des kurzfristigen Potenzials von E-Kraftstoffen

E-Kraftstoff	Kurzfristiges technisches Potenzial	Kommentare
Ammoniak	+	Produktion von grünem Wasserstoff erforderlich
DME	o	Erzeugung von grünem Wasserstoff erforderlich; nachhaltige CO ₂ -Quelle in großem Maßstab fehlt; Hochskalierung entweder der direkten Methanolsynthese oder der umgekehrten Wasser-Gas-Shift-Reaktion erforderlich
Wasserstoff	+	Herstellung von grünem Wasserstoff
Methan	o	Erzeugung von grünem Wasserstoff; nachhaltige CO ₂ -Quelle in großem Maßstab fehlt; Upscaling des Sabatier-Prozesses erforderlich
Methanol	o	Erzeugung von grünem Wasserstoff; nachhaltige CO ₂ -Quelle in großem Maßstab fehlt; Upscaling der direkten Methanolsynthese oder der umgekehrten Wasser-Gas-Shift-Reaktion erforderlich
Kerosin und andere flüssige Brennstoffe	-	Herstellung von grünem Wasserstoff; nachhaltige CO ₂ -Quelle in großem Maßstab fehlt; Hochskalierung der direkten Methanolsynthese oder der umgekehrten Wasser-Gas-Shift-Reaktion erforderlich; Verarbeitung von Methanol zu Kerosin erforderlich

Anmerkungen: ++ sehr positiv, + positiv, o mittel, - negativ, -- sehr negativ

Quelle: Eigene Einschätzung

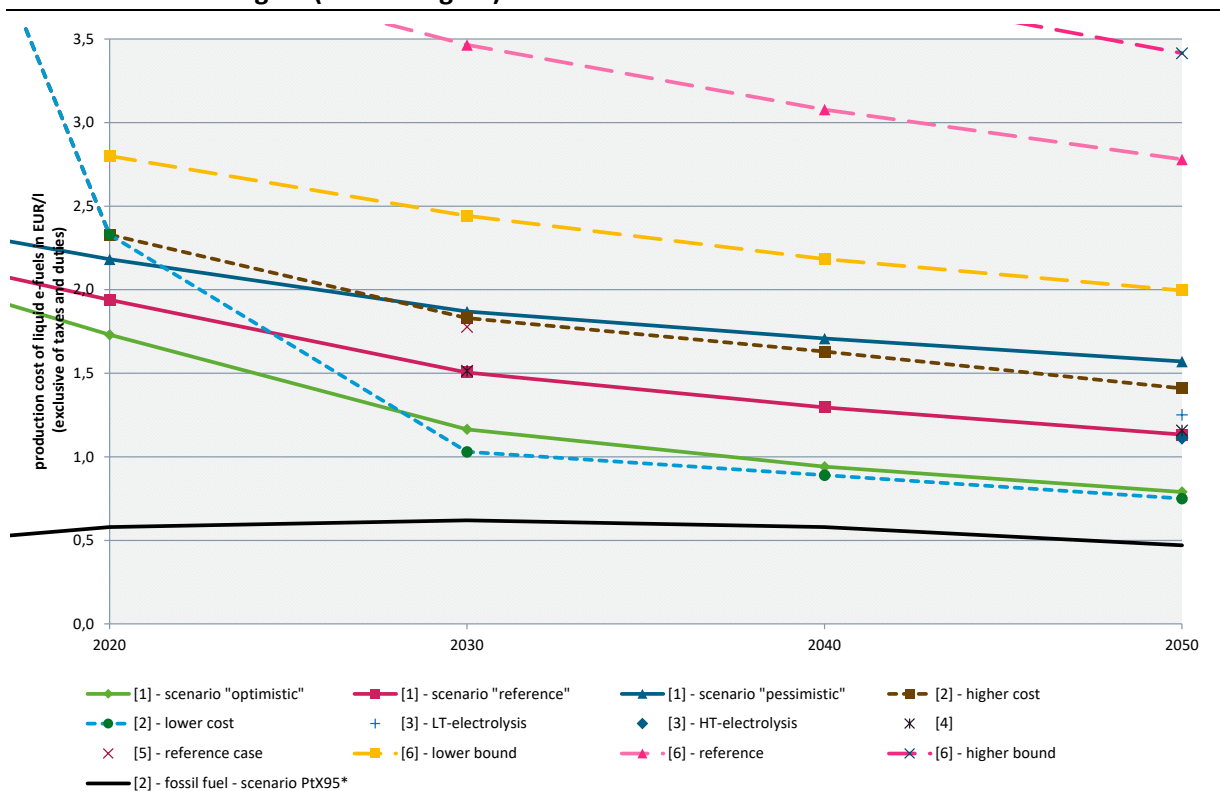
4.2 Produktionskosten und Preise

Entscheidende Faktoren für die Kosten der E-Fuel-Erzeugung sind die Höhe der Kapitalkosten sowie die Kosten für den eingesetzten Strom und die Auslastung der Kraftstoffproduktionsanlage. Geringere Kosten für die regenerative Stromerzeugung und ein potenziell höherer Auslastungsgrad der Kraftstoffanlage sprechen für die Produktion von E-Fuels an günstigen Standorten für die regenerative Stromerzeugung. Bei der Herstellung von Kohlenwasserstoffen kann auch die Bereitstellung von CO₂ eine relevante Kostenkomponente sein (Brynnolf et al. 2017).

Derzeit sind die Produktionskosten von E-Fuels um ein Vielfaches höher als die Kosten ihrer jeweiligen fossilen Alternativen. Abbildung 3 gibt einen Überblick über verschiedene Kostensze-

narien für die Produktion von flüssigen E-Kraftstoffen an günstigen Standorten für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in der Region Naher Osten und Nordafrika (MENA). Die geschätzten Produktionskosten für 2020 sind nicht weniger als drei- bis viermal so hoch wie die für fossile Brennstoffe. In den Szenarien mit positiver Kostenentwicklung, d. h. mit niedrigen Kosten für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und niedrigen Investitionskosten für Elektrolyseure und die Synthesenanlagen für die Kraftstoffherstellung, sind die Kosten für die Herstellung von flüssigen E-Kraftstoffen langfristig höher als die von fossilen Kraftstoffen. Abbildung 3 zeigt auch die große Unsicherheit der potenziellen künftigen E-Kraftstoffkosten, da die Szenarien mit hohen Kosten in den meisten Berechnungen mindestens mehr oder weniger doppelt so hoch sind wie die Kosten der günstigsten Entwicklung.

Abbildung 3: Verschiedene Produktionskostenszenarien für die Herstellung von flüssigem E-Kraftstoff an einem günstigen Standort für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (MENA-Region)



Anmerkungen: Die Produktionskosten für fossile Brennstoffe beziehen sich in der zitierten Studie auf fossilen Diesel.

Quellen: Eigene Zusammenstellung aus verschiedenen Quellen: [1]: AVW; AEW; FE (2018); [2]: MWV; IWO; MEW; UNITI (2018); [3]: dena; LBST (2017); [4]: IWES (2017); [5]: CTH; IVL (2017); [6]: Prognos (2020)

Die Differenz zwischen den Produktionskosten von E-Fuels und denen fossiler Brennstoffe hängt auch von der Entwicklung der Kosten fossiler Brennstoffe ab, die ebenfalls keine externen Effekte beinhalten. Die niedrigen Kosten für fossiles Flüssigerdgas (LNG) erschweren jedoch den Marktzugang für E-Methan im Vergleich zu den anderen Energieversorgungsoptionen (siehe Kostenberechnungen in AVW; AEW; FE 2018).

Wie bei anderen Kraftstoffen wird sich der Preis von E-Kraftstoffen letztlich aus dem Angebot und der Nachfrage nach den Kraftstoffen und nicht nur aus den Produktionskosten entwickeln. Insbesondere in der Anfangsphase des Marktes kann es vorkommen, dass einige wenige Produktionsstandorte und Regionen die Produktion dominieren. Die mögliche Folge könnte eine große

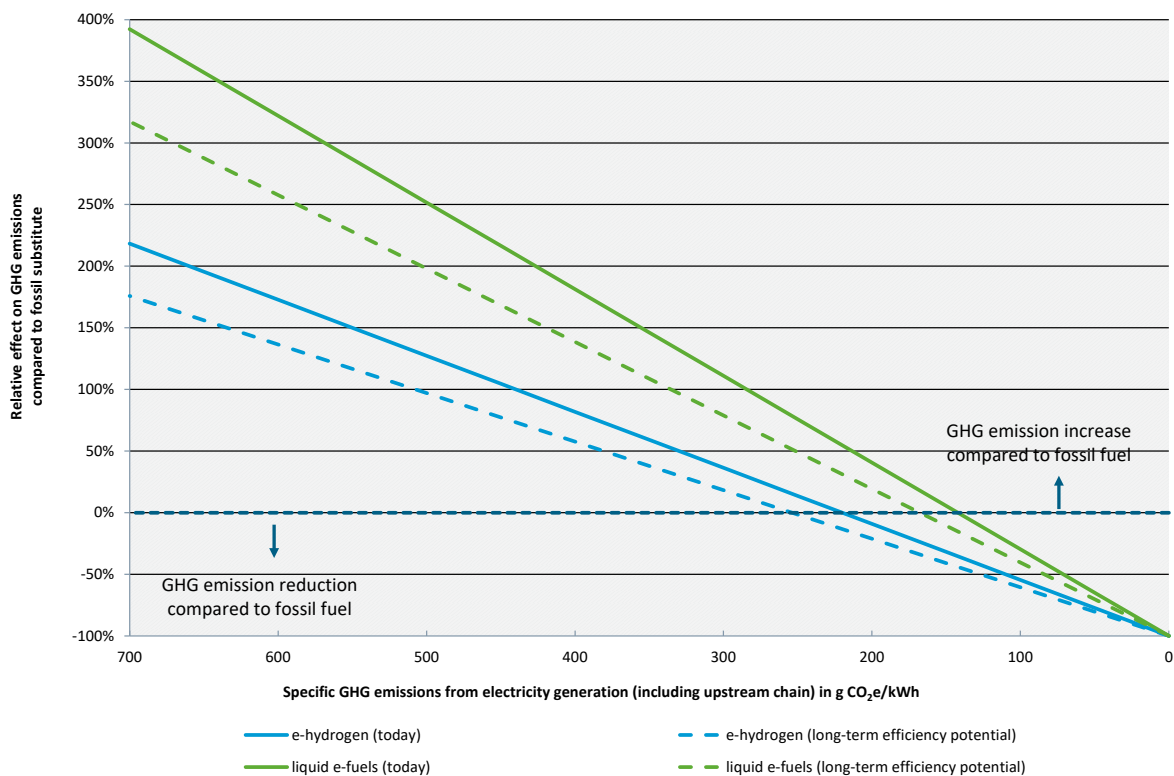
Marktmacht dieser Akteure sein, die bei möglichen Einführungsstrategien für die E-Kraftstoff-Produktion berücksichtigt werden müssten.

4.3 Treibhausgasminderungspotenzial

E-Fuels haben das Potenzial, sehr klimafreundlich produziert zu werden und damit die THG-Bilanz des Luft- und Seeverkehrs enorm zu verbessern. Ausschlaggebend für die THG-Bilanz ist die Quelle des Stroms und des Kohlendioxids.

Ähnlich wie die Produktionskosten sind der Stromverbrauch und die THG-Intensität des eingesetzten Stroms die entscheidenden Faktoren für die Klimawirkung der E-Fuel-Produktion (Abbildung 4). Hohe Umwandlungsverluste und die großen Mengen an erneuerbarer Energie, die für die Bereitstellung von nicht-fossilem CO₂ benötigt werden, führen zu vergleichsweise hohen verbleibenden Lebenszyklus-CO₂-Emissionen der E-Fuel-Produktion. Daher muss die Lebenszyklus-THG-Intensität des für die E-Kraftstoff-Produktion verwendeten Stroms aus erneuerbaren Energien unter 120 bis 250 g CO₂e pro kWh liegen, um eine geringere Klimawirkung als fossile Kraftstoffe zu erzielen. Die eingebetteten THG-Emissionen aus erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten und andere potenzielle Umweltauswirkungen müssen ebenfalls in die Bewertung einbezogen werden (DECHEMA 2019). Sie nehmen mit der erwarteten Umstellung des Energiesektors und der Industrieproduktion auf kohlenstoffarme Sektoren mit der Zeit ab. Ein vollständig THG-neutraler PV- und Windkraftanlagenpark für die Stromeinspeisung in die E-Kraftstoffproduktion ist jedoch nicht vor 2050 zu erwarten (UBA 2020). Eine vollständig klimaneutrale Kraftstoffproduktion wäre erst dann möglich, wenn auch die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien einschließlich der darin enthaltenen Emissionen vollständig klimaneutral ist.

Abbildung 4: THG-Emissionen der Produktion von flüssigen E-Kraftstoffen und E-Wasserstoff in Abhängigkeit von der THG-Intensität des Stromeinsatzes



Anmerkungen: Angewandte Daten für fossile Energieträger: 338 g CO₂e/kWh (fossiler Wasserstoff); 317 g CO₂e/kWh (fossile Flüssigkeit).

Quellen: Eigene Darstellung; Daten für fossile Energieträger aus Ecoinvent-Zentrum (2018) und thinkstep AG (2018)

Da der Luft- und Seeverkehr jedoch durch lange Laufzeiten von Fahrzeugen und Infrastrukturen gekennzeichnet ist und zudem im Einklang mit dem Temperaturziel des Pariser Abkommens zu dekarbonisieren ist, muss der Übergang zu E-Kraftstoffen so schnell wie möglich erfolgen. Ein Aufschub, bis die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien vollständig klimaneutral ist, stellt keine Option dar. Die Produktion von möglichst klimafreundlichen E-Fuels erfordert bestimmte Produktionsbedingungen bei der Integration in bestehende Energiesysteme. Für die THG-Bilanzierung ist es notwendig, die Auswirkungen des zusätzlichen Strombedarfs auf Systemebene zu bewerten. Eine Bilanzierung auf Basis einer reinen Kraftstoffproduktionsanlage ist für die Bewertung der THG-Emissionen nicht ausreichend (Öko-Institut 2019). Insbesondere in Energiesystemen, die in der Transformationsphase zur treibhausgasneutralen Energieversorgung noch einen hohen Anteil an fossiler Stromerzeugung im Strommix haben, müssen daher besondere Voraussetzungen für die Produktion klimafreundlicher E-Fuels gelten.¹² Um den eingesetzten Strom als Null-Emissions-Strom betrachten zu können, muss dieser Strom aus Erneuerbare-Energien-Anlagen stammen, die zusätzlich zum geplanten Ausbaupfad in Betrieb genommen werden. Diese Erneuerbare-Energien-Anlagen dürfen nicht auf die bestehenden Ausbauziele für erneuerbare Energien in den Erzeugerländern angerechnet werden bzw. die Ausbauziele müssen entsprechend erhöht werden.

Bei der Herstellung von E-Kraftstoffen auf Kohlenstoffbasis ist die CO₂-Zufuhr ein zweiter relevanter Parameter, der sich auf die THG-Bewertung von E-Kraftstoffen auswirkt. Die CO₂-Zufuhr ist THG-neutral, wenn das verwendete CO₂ einen Kreislauf mit der Umgebungsluft ermöglicht oder wenn das CO₂ auf natürliche Weise an die Umwelt abgegeben wird. Dementsprechend kann CO₂ aus der Umgebungsluft oder aus Prozessen mit nachhaltiger Biomasse als potenziell THG-neutral angesehen werden. Der für die Abscheidung des CO₂ benötigte Strom und die Wärme müssen die oben genannten Kriterien für die Nutzung von Strom in den Produktionsanlagen erfüllen, um die Herstellung von kohlenwasserstoffhaltigen E-Kraftstoffen so klimafreundlich wie möglich und potenziell klimaneutral zu gestalten.

Um sicherzustellen, dass E-Kraftstoffe nachhaltig sind und zur Verringerung der Treibhausgasemissionen beitragen, muss die Produktion von E-Kraftstoffen strengen Kriterien genügen. Die Definition solcher Nachhaltigkeitskriterien ist von herausragender Bedeutung für die Klimaschutzwirkung von E-Fuels sowie für die Gewährleistung der allgemeinen Nachhaltigkeit in Bezug auf Energie, Wasser, Landnutzung und andere Ressourcen. Dies gilt umso mehr in der Transformationsphase von der heutigen fossilen Energieversorgung hin zu zukünftigen erneuerbaren und klimafreundlichen Energiesystemen. Andernfalls besteht die Gefahr, dass in dieser Übergangsphase nicht nachhaltige E-Fuels mit höheren Treibhausgasemissionen als fossile Brennstoffe produziert werden. Langfristig ist die Produktion weitgehend klimaneutraler E-Fuels jedoch prinzipiell möglich.

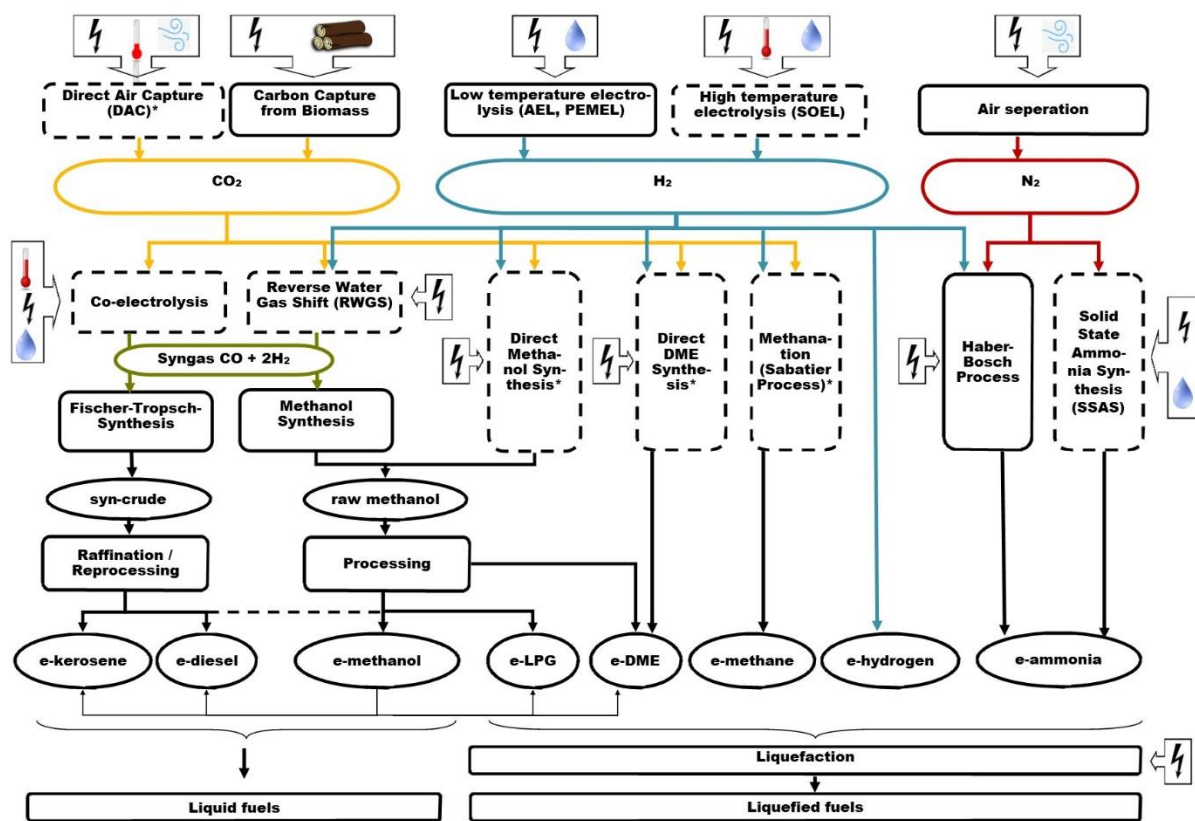
4.4 Gesamtwirkungsgrad der Umwandlung

Die Produktion der möglichen Endenergieträger besteht aus mehreren Prozessschritten. Um die gesamte Umwandlungseffizienz und den daraus resultierenden Strombedarf zu vergleichen, muss die gesamte Produktionskette betrachtet werden. Abbildung 5 zeigt einen Überblick über

¹² Die durchschnittlichen THG-Emissionen von Strom in Deutschland im Jahr 2018 werden auf bis zu 641 g CO_{2e}/kWh geschätzt UBA (2019). Bei Anwendung dieses Wertes für den Stromeinsatz in der E-Kraftstoff-Produktion würde die derzeitige Produktion von E-Wasserstoff und E-Liquids zu 2,1 (E-Wasserstoff) bis 3,7-mal (E-Liquids) so hohen THG-Emissionen führen wie bei ihren fossilen Pendanten.

die Prozessketten. Gestrichelte Linien kennzeichnen Prozesse, die derzeit nicht im industriellen Maßstab verfügbar sind. Einige dieser Verfahren befinden sich erst in der frühen Pilot- und Demonstrationsphase. Andere sind weiter fortgeschritten und müssen schließlich auf größere Kapazitäten erweitert werden, um E-Kraftstoffe in relevantem Umfang herzustellen.

Abbildung 5: Überblick über die verschiedenen Prozessketten von E-Fuel



Anmerkungen: *Diese Verfahren sind technisch verfügbar, müssen aber für die industrielle Massenproduktion auf großindustrielle Dimensionen hochskaliert werden.

Quelle: Eigene Darstellung

In Tabelle 5 werden die Gesamtwirkungsgrade der verschiedenen E-Kraftstoffe auf der Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche verglichen:

- ▶ Verflüssigter E-Wasserstoff hat heute und in Zukunft den geringsten Energiebedarf für die Produktion. Der Grund dafür ist offensichtlich, wenn man sich die Prozesskette ansieht. Bei der Verflüssigung von Wasserstoff findet nach der Elektrolyse ein weiterer energieintensiver Prozess statt, ohne dass dadurch sein Vorteil als Energieträger mit einer sehr hohen massenbezogenen Energiedichte im Vergleich zu den anderen Optionen aufgehoben wird. Voraussetzung ist, dass der Energiebedarf für die Verflüssigung – wie angenommen – in Zukunft deutlich geringer sein wird und dass es eine sinnvolle Anwendung für den verdampften Wasserstoff aus dem gespeicherten verflüssigten Wasserstoff gibt (Boil-off).
- ▶ Zur Herstellung von Ammoniak wird nach der Wasserstofferzeugung eine einstufige Ammoniaksynthese aus Stickstoff und Wasserstoff durchgeführt (Haber-Bosch-Verfahren). Im Vergleich zur Kohlenwasserstoffproduktion hat dies einen Effizienzvorteil, der hauptsächlich auf den geringen Energieaufwand für die Abtrennung von Stickstoff im Vergleich zu CO₂ aus Luft zurückzuführen ist. Außerdem muss Ammoniak für die Verflüssigung nur komprimiert

werden, was einen geringen Energieaufwand bedeutet, im Gegensatz zu Wasserstoff oder Methan, die beide eine kryogene Lagerung erfordern. Somit hat E-Ammoniak den zweithöchsten Gesamtwirkungsgrad unter diesen Optionen, wenn man den Energiebedarf für die Herstellung und Verflüssigung berücksichtigt.

- ▶ Für die Kohlenwasserstoffe Methan, Methanol und DME rechnen wir mittel- und langfristig mit einstufigen Syntheseprozessen, wenn sie aus Strom über Elektrolyse hergestellt werden. Dies führt zu sehr ähnlichen Energieverlusten entlang der Prozesskette. Der geringere CO₂-Bedarf für Methan wird dadurch kompensiert, dass für die Verflüssigung von Methan zusätzliche Energie benötigt wird. Der Nachbearbeitungsbedarf der Syntheseprodukte ist im Vergleich zur Herstellung anderer flüssiger E-Kraftstoffe gering. Die geeignete Nutzung des Methanabbrandes ist erforderlich, um das Abgleiten von Methan in die Atmosphäre zu verhindern und die Effizienz zu erreichen.
- ▶ Die Herstellung von flüssigen E-Fuels ist mit dem höchsten Energieaufwand verbunden. Im Vergleich zu den anderen Prozessketten sind mehr Prozessschritte erforderlich. Entweder können zweistufige Syntheseverfahren mit anschließender Veredelung zur Herstellung von E-Liquids eingesetzt werden oder es ist eine energieintensivere Nachbearbeitung notwendig, wenn die flüssigen E-Fuels über die einstufige Methanolsynthese hergestellt werden.

Tabelle 5: Umwandlungswirkungsgrad von Strom in Endenergieträger für verschiedene E-Kraftstoffe

In kWh _{Kraftstoff,LHV} /kWh _{el}	Derzeit	Langes Potential	Bewertung
Ammoniak	52%	60%	o
DME	45%	56%	-
Wasserstoff*	53%	64%	+
Methan*	48%	57%	-
Methanol	45%	56%	-
Kerosin und andere flüssige Brennstoffe	45%	53%	--

Anmerkungen: *Die möglichen Verluste aufgrund des Abdampfens von verflüssigtem Methan und Wasserstoff werden beim Vergleich der Wirkungsgrade vernachlässigt. Es wird davon ausgegangen, dass Methan und Wasserstoff aus dem Boil-off aufgefangen und genutzt werden und keine energetischen Verluste verursachen.

Quelle: Eigene Zusammenstellung und Bewertung

Der Stromverbrauch für die E-Fuel-Produktion ist für viele der Bewertungskriterien ein sehr relevanter Faktor. Je geringer der Stromeinsatz ist, desto besser ist die THG-Bilanz des jeweiligen Kraftstoffs. Wasserstoff und Ammoniak haben also auch in dieser Bewertungskategorie einen Vorteil gegenüber anderen Kraftstoffen. Bei den Kohlenwasserstoff-Kraftstoffen besteht zudem die Gefahr, dass der Einsatz von CO₂ die THG-Reduktion im Energie- und Industriesektor verlangsamt. Aufgrund der hohen Klimawirkung von Methan besteht auch das Risiko eines Methanschlupfs bei der Produktion, dem Transport, der Lagerung und der Nutzung von E-Methan. Langfristig kann die Verwendung von E-Methan mit potenziell null THG-Emissionen daher nicht garantieren, dass die für die langfristigen Klimaschutzziele notwendige THG-Minderung erreicht wird (Horvath et al. 2018).

Die Kosten für den Strombezug und die Kapitalkosten sind entscheidende Faktoren für die Produktionskosten. Auch hier ergeben sich Vorteile für die Verfahren, die eine bessere Energieeffizienz aufweisen. Insgesamt führt eine höhere Energieeffizienz zu einer geringeren Gesamtkapazität der Produktionsanlagen und erfordert weniger Strom für die gleiche Energiemenge des erzeugten Brennstoffs. Ein weiterer Unterschied liegt in der Art der Verfahren. Die Wasserstoffherzeugung mit Elektrolyseuren ist ein eher modularer Prozess; eine Vergrößerung der Anlage führt tendenziell zu einem geringeren Kostensenkungspotenzial (DECHEMA 2019). Die Kostensenkungspotenziale aus verschiedenen Studien können mit eher kleinen Elektrolyseuranlagen ausgeschöpft werden. Dagegen ist das Reaktorvolumen ein relevanter Faktor für die Kosten der Syntheseprozesse und die Kostendegression wird vor allem durch ein Upscaling der Reaktorgröße erreicht. Wasserstoff und Ammoniak (im Falle der Substitution von fossilem Wasserstoff in bestehenden Ammoniakproduktionsanlagen) werden einen Kostenvorteil bei den Produktionskosten haben.

4.5 Zusammenfassung

Prinzipiell ist es möglich, E-Fuels so zu produzieren, dass sie eine vollständig postfossile Energienutzung im Luft- und Seeverkehr ermöglichen. Voraussetzung dafür ist, dass neben der Nutzung von zusätzlichem erneuerbarem Strom das eingesetzte CO₂ – sofern es zur Herstellung von Kohlenwasserstoff-Kraftstoffen benötigt wird – einen CO₂-Kreislauf mit der Atmosphäre bildet. Langfristig wird dabei die Nutzung von CO₂ aus der Umgebungsluft eine zentrale Rolle spielen. Damit E-Fuels vollständig klimaneutral sind, müssen zudem die Emissionen in der Vorkette der erneuerbaren Stromerzeugung mit der Zeit auf Null sinken.

Im Hinblick auf die erwartete Klimaschutzwirkung von E-Fuels besteht die Herausforderung darin, sicherzustellen, dass der zusätzliche Strombedarf der E-Fuel-Produktion nicht zu höheren THG-Emissionen im Stromsystem beiträgt, insbesondere in der Transformationsphase der Energiesysteme, in der fossile Energieträger noch zur Stromerzeugung beitragen. Ebenso darf der erwartete Rückgang der CO₂-Emissionen aus industriellen Punktquellen nicht durch die steigende Nachfrage nach CO₂ als Rohstoff für die Kraftstoffherstellung gebremst werden. Deshalb sind verlässliche Nachhaltigkeits- und Klimaschutzregelungen notwendig, um die Klimaschutzwirkung der eingesetzten E-Fuels in der Transformationsphase zu einem vollständig erneuerbaren Energiesystem sicherzustellen.

Die Kosten von E-Kraftstoffen sind heute höher als die von fossilen Kraftstoffen und werden auch langfristig höher bleiben. Sie erfordern daher politische Instrumente für den Einsatz im Luft- und Seeverkehr. Inwieweit die Kosten für E-Kraftstoffe sinken, hängt vor allem von den Investitionskosten für Elektrolyseure und den Stromkosten für die E-Kraftstoffproduktion ab. Die Szenarien zeigen für die langfristige Entwicklung Kosten, die um ein Vielfaches voneinander abweichen, so dass aus heutiger Sicht keine Aussage darüber getroffen werden kann, welches Kostenniveau diese Kraftstoffe langfristig realistisch erreichen werden. Für die E-Fuel-Produktion sind Standorte mit niedrigen Erzeugungskosten für erneuerbaren Strom, verfügbaren Flächenpotenzialen und einem hohen Governance-Niveau von Vorteil. Entsprechend sind langfristig Importe nach Deutschland und in die EU in erheblichem Umfang aus Regionen mit hohem Governance-Niveau zu erwarten.

Tabelle 6: Bewertung der Wirkungskategorien für verschiedene E-Kraftstoffe (langfristige Perspektive)

	Landnutzung	Produktionskosten	Treibhausgasminderungspotenzial
Ammoniak	o	o	++

	Landnutzung	Produktionskosten	Treibhausgasminderungspotenzial
DME	-	-	++
Wasserstoff	+	+	++
Methan	-	-	+ (Gefahr von Methanschleupf)
Methanol	-	-	++
Kerosin und andere flüssige Brennstoffe	--	--	++

Anmerkungen: Ein Plus bedeutet, dass eine Option im Vergleich zu den anderen Optionen relativ besser bewertet wird, während ein Minus bedeutet, dass eine Option weniger positiv bewertet wird.

Quelle: Eigene Einschätzung

E-Fuels werden kurzfristig nicht in relevanten Mengen verfügbar sein. Die technischen Herausforderungen liegen in der notwendigen Automatisierung der Produktion von Elektrolyseuren, dem Stand der Technik und der notwendigen Skalierung einzelner Prozesse zur E-Fuel-Produktion. Während Wasserstoff und Ammoniak durch Substitution von fossilem Wasserstoff relativ bald industriell hergestellt werden könnten, wird die Inbetriebnahme der ersten großtechnischen Anlagen für die anderen E-Fuels nicht vor 2028-2030 erwartet. Neben den Produktionsanlagen steht der Hochlauf der Produktionskapazitäten auch vor der Herausforderung, in kurzer Zeit zusätzliche erneuerbare Stromerzeugungskapazitäten in ausreichendem Umfang bereitstellen zu können. Langfristig kann jedoch davon ausgegangen werden, dass ein ausreichendes Potenzial für die Produktion von E-Fuels vorhanden ist, um den See- und Luftverkehr mit postfossilen Kraftstoffen zu versorgen.

Unter den verschiedenen E-Kraftstoffen weisen Wasserstoff und Ammoniak die geringsten Umwandlungsverluste vom Strom zum Endprodukt auf. Methanol, verflüssigtes Methan und DME haben höhere Umwandlungsverluste, sind aber effizienter in der Herstellung als flüssige E-Kraftstoffe wie E-Kerosin, welcher besonders im Flugverkehr relevant wird. Die dabei entstehenden Nebenprodukte wie E-Diesel oder E-Methanol können im maritimen Sektor verwendet werden, obwohl sie im Hinblick auf den Energieverbrauch weniger effizient sind als Wasserstoff oder Ammoniak. Da sich die Effizienz direkt auf den Strombedarf für die Herstellung von E-Kraftstoffen auswirkt, ergibt sich eine ähnliche Rangfolge für den Vergleich der Kraftstoffherstellungskosten und der für die E-Kraftstoffherstellung genutzten Flächen. Rein aus der Perspektive der Kraftstoffherstellung haben Ammoniak und Wasserstoff also leichte Vorteile gegenüber den anderen Kraftstoffoptionen.

5 Roadmap zur Erreichung von Nullemissionen

Wie kann ein vollständiger Übergang zu postfossilen Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien (E-Fuels) bis 2050 erreicht werden? Wir befassen uns mit konkreten Umsetzungsoptionen und praxisorientierten Vorschlägen für Politiken und Instrumente auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene (Roadmaps). Die Technologien zur Herstellung und Nutzung einzelner E-Fuels und die damit verbundenen Kostenprognosen entwickeln sich sehr dynamisch. Ihre Rolle in der zukünftigen Energieversorgung der Luft- und Seeschifffahrt sowie die Politiken und Instrumente zur Förderung ihrer Einführung werden derzeit auf mehreren politischen Ebenen sowie in Wissenschaft und Industrie intensiv diskutiert. Dementsprechend können solche Roadmaps nicht alle Nuancen dieser Entwicklungen und Diskussionen widerspiegeln, sondern sollten als in sich konsistente Konzepte eines möglichen Politikdesigns betrachtet werden, um die Verflechtungen der Aktivitäten auf verschiedenen politischen Ebenen zu veranschaulichen.

Jede Roadmap stellt daher ein Konzept der möglichen Entwicklung dar, das in vielen Fällen geändert oder durch völlig andere Roadmaps ergänzt werden könnte.

Für die Schifffahrt werden mehrere Optionen für den Ersatz fossiler Brennstoffe diskutiert, und es gibt derzeit keine eindeutig bevorzugte Lösung. Aus diesem Grund haben wir zwei verschiedene Roadmaps entwickelt. Einen, der die Einführung von E-Methanol fördert¹³ und einen anderen, der technologieoffen ist und E-Kraftstoffe unspezifisch fördert. Ein technologiespezifischer Ansatz, in diesem Fall für E-Methanol, könnte den Vorteil haben, dass der Übergang schneller vollzogen wird. Die parallele Entwicklung mehrerer Optionen könnte kostspieliger sein und der Verzicht auf fossile Brennstoffe in der Schifffahrt bis 2050 könnte daher eine noch größere Herausforderung darstellen. Dennoch gibt es gute Gründe vorerst einen technologieoffenen Ansatz zu verfolgen. Ein technologieoffener Ansatz kann zu mehr Innovation anregen (Baumol 2002) und kann möglicherweise leichter reagieren, wenn sich ein bestimmter Weg als zu kostspielig erweist oder auf andere große Hindernisse stößt. Die frühzeitige Festlegung auf eine bestimmte Technologie birgt das Risiko, dass nicht die beste Option gewählt wird.

5.1 E-Methanol-Roadmap

Methanol (MeOH) ist einer der am einfachsten zu handhabenden E-Kraftstoffe, da es bei atmosphärischen Bedingungen flüssig ist. Es gibt nur wenige Hindernisse für die Ausweitung, so dass es als Verkehrs- und Schiffskraftstoff attraktiv ist, zumal es in einem Verbrennungsmotor viel weniger NO_x, PM und Rußemissionen verursacht als fossile Schiffskraftstoffe. Außerdem ist es ein Wasserstoffträger, der pro Volumeneinheit 40% mehr Wasserstoff enthält als flüssiger Wasserstoff, der auch in Kombination mit Brennstoffzellen verwendet werden könnte und für dessen Synthese nur etwa so viel Energie pro Einheit benötigt wird, wie für die Speicherung von Wasserstoff.

5.1.1 Nationale Aktivitäten

Um die Produktion und Einführung von E-Methanol zu initiieren, sollte ein **Leuchtturmprojekt** eingerichtet werden. Ziel ist es, ein gewisses Maß an E-Methanol aus erneuerbaren Quellen in der Schifffahrt, die deutsche Häfen anläuft, zu erreichen und zwar sowohl auf neuen als auch auf bestehenden Schiffen durch Kraftstoffbeimischung, Umrüstung auf Dual-Fuel-Motoren oder auf Brennstoffzellen, um zu zeigen, dass die Technologie mit E-Methanol funktioniert. Weltweit sind bereits mehr als 10 Schiffe mit MeOH (Methanol-Institut 2020), betrieben, so dass diese Technologie als erprobt angesehen werden kann. Das Leuchtturmprojekt soll beweisen, dass E-MeOH sowohl fossiles MeOH als auch andere fossile Kraftstoffe ersetzen kann, und den Startschuss für den Bau von Produktionsstätten für E-Methanol in Deutschland geben.¹⁴

¹³ E-Methanol wurde auf der Grundlage einer multikriteriellen Analyse von sieben alternativen Kraftstoffen (E-Wasserstoff, E-Ammoniak, E-Methan, E-Methanol, E-Propan, E-DME und E-Diesel) ausgewählt. Bei der Bewertung wurden Umweltkriterien (Treibhausgasemissionspotenzial, Energieeffizienz des Produktionsprozesses, Toxizität, Entflammbarkeit und Explosionsgefahr), technologische Bereitschaft (Produktion, Schiffe, Häfen, Drop-in-Potenzial, gesetzliche Bestimmungen) und Kosten (Kraftstoffkosten, Energiedichte, schiffsseitige Kapitalkosten und Synergien mit anderen Sektoren) berücksichtigt.

¹⁴ Ein erstes Pilotprojekt zur Herstellung von E-MeOH ist bereits im RWE-Kraftwerk in Niederaußem/Deutschland in Betrieb. Dabei wird die von Carbon Recycling International (CRI) mit Sitz in Island entwickelte Emission-to-Liquid-Technologie (ETL) eingesetzt. Allerdings stammen sowohl der Strom als auch der CO₂-Input aus fossilen Quellen, so dass der Output nicht als postfossiler Brennstoff betrachtet werden kann. Das Projekt hat jedoch gezeigt, dass postfossiles E-MeOH mit dieser Technologie in industriellem Maßstab hergestellt werden kann, wenn der Input aus postfossilen Quellen stammt (i-deals (2016); CRI (2020)). Weitere Projekte könnten auf den hier gewonnenen Erfahrungen aufbauen.

Bis 2025 sollte es Schiffe geben, die mit mindestens 50% E-MeOH betrieben werden können, und bis spätestens 2030 kann ein Betrieb mit 100% E-MeOH nachgewiesen werden.¹⁵ Dies würde ausgewählte Schiffe betreffen, die deutsche Häfen anlaufen. Es muss auch entschieden werden, wer den CAPEX für Schiffsum- und -neubauten, für die Methanolproduktionsanlagen und für die Deckung des zusätzlichen Kraftstoff-OPEX im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen trägt.

Das Leuchtturmprojekt könnte die nicht-kommerzielle Schifffahrt einbeziehen, bei der nur in deutschen Häfen gebunkert wird, z.B. Schiffe der Küstenmarine oder Küstenwache, Behördenschiffe und Forschungsschiffe. Deutschland könnte auch eine Vorreiterrolle in Europa übernehmen, indem es die schrittweise Umrüstung der Motoren von Regierungs- und/oder Forschungsschiffen auf Methanol sowie die schnellstmögliche Umstellung auf E-Methanol-Antrieb vorschreibt.

Um die Arbeiten auf nationaler und EU-Ebene zu beschleunigen, sollte sich die deutsche Industrie (unterstützt durch nationale Projektmittel) verstärkt um Partnerschaften mit bestehenden und neuen Forschungs- und Industriegruppen in den Nachbarländern bemühen und sich dabei insbesondere auf die Ermittlung offener Fragen konzentrieren, die weitere F&E-, Triebwerks- oder Infrastrukturarbeiten usw. erfordern. Die Zusammenarbeit mit der Europäischen Kommission und anderen einschlägigen EU-Einrichtungen, einschließlich der EMSA und der Gemeinsamen Forschungsstelle in Ispra, zur Lösung dieser offenen Fragen sollte intensiviert werden.

5.1.2 Europäische Politik

Ziel auf EU-Ebene ist es, eine EU-weite Politik der Nachfragesteigerung zu entwickeln und umzusetzen, welche die beschleunigte Einführung von E-MeOH in allen EU-Häfen sicherstellt und Europa auf den Weg bringt, bis 2050 vollständig auf fossile Brennstoffe in der Schifffahrt in Europa und/oder durch europäische Schiffe/Betreiber zu verzichten.

Um Anreize zur Steigerung der Akzeptanz zu schaffen, könnte eine physische **E-Methanol-Beimischungspflicht** eingeführt werden. Da die physische Einspeisung bei größeren Anteilen jedoch möglicherweise nicht machbar ist, kann die Mindestquote nicht von jedem einzelnen Unternehmen erreicht werden, sondern muss im Durchschnitt der erfassten Unternehmen erreicht werden. Um dies zu gewährleisten, könnte die Beimischungspflicht auf der Grundlage eines Book-and-Claim-Systems eingeführt werden (Pechstein et al. 2020) mit E-Methanol-Zertifikaten.

Die Zertifikate würden an Lieferanten von förderfähigem E-Methanol ausgestellt. Sie würden von akkreditierten dritten Prüfern zertifiziert, die bescheinigen, dass das E-Methanol ähnliche Anforderungen erfüllt wie die Anforderungen der RED für Biokraftstoffe, die alle vorgelagerten Treibhausgasemissionen und andere Umweltauswirkungen berücksichtigen.¹⁶ Die Verpflichtung zur Abgabe solcher Zertifikate könnte an verschiedene Tätigkeiten geknüpft werden, vor allem an den Verkauf, den Kauf oder die Verwendung von Kraftstoff für den Seeverkehr. Die betroffe-

¹⁵ A.P. Møller - Mærsk will bis 2023 ein 2 000-TEU-Containerschiff mit E-MeOH betreiben, räumt aber ein, dass die Beschaffung des Kraftstoffs in den erforderlichen Mengen eine große Herausforderung sein wird, <https://www.maersk.com/news/articles/2021/02/17/maersk-first-carbon-neutral-liner-vessel-by-2023>.

¹⁶ Die Nachhaltigkeitskriterien für die Herstellung von E-Kraftstoffen und die Methodik für die Berechnung der THG-Reduktionen von E-Kraftstoffen müssen bis zum 31.12.2021 durch zwei delegierte Rechtsakte gemäß Art. 27 (3) und Art. 28 (5) der RED II (ABl. L 328 vom 21.12.2018).

nen Unternehmen wären verpflichtet, für jede Kraftstoffeinheit einen Anteil an E-Methanol-Zertifikaten abzugeben, der im Laufe der Jahre ansteigt.

Politisch müsste noch erörtert werden, ob der Kraftstoff, der sowohl auf den eingehenden als auch auf den ausgehenden Strecken zu/von Häfen außerhalb der EU verbraucht wird, unter die Verpflichtung fällt oder ob nur ein Teil des auf diesen Strecken verbrauchten Kraftstoffs erfasst wird (z. B. 50%). Würden alle ausgehenden und eingehenden Fahrten einbezogen, wäre auch der Anreiz für die Produktion von E-Methanol größer als bei einem angebots- oder nachfrageorientierten Ansatz.

Das beauftragte Unternehmen müsste Zertifikate von E-Methanol-Herstellern kaufen, die diese Zertifikate zu einem Preis verkaufen, den sie benötigen, um die zusätzlichen Kosten der E-Methanol-Produktion zu finanzieren, während sie das E-Methanol zu einem ähnlichen Preis wie fossile Brennstoffe verkaufen. Auf diese Weise würden die zusätzlichen Kosten der E-Methanol-Produktion nicht nur von den Unternehmen getragen, die das E-Methanol tatsächlich kaufen, sondern von allen erfassten Unternehmen. Um das Ziel von 100% im Jahr 2050 zu erreichen, müssten die durch diese Verpflichtung zu erreichenden Anteile stark ansteigen, z. B. von 2% im Jahr 2025 auf 5% und 33% im Jahr 2030 bzw. 2035 und auf 100% im Jahr 2050.

5.1.3 Internationale Zusammenarbeit

Neben einer Initiative in Europa könnte auch in anderen Regionen mit hoher Bunkernachfrage eine Umstellung auf Methanol oder eine Beimischungspflicht in Betracht gezogen werden. Die Umsetzung einer solchen Politik für chinesische Häfen könnte angesichts der lokalen Verfügbarkeit von Methanol und der drängenden Problematik der Luftqualität einfach sein. Das größte Potenzial für die Entwicklung der mit Methanol betriebenen Schifffahrt außerhalb Europas liegt daher in China, dem mit Abstand größten Methanolerzeuger der Welt, der auch die weltweite Nachfrage dominiert.

Die verbleibende Zeit bis zur Defossilisierung ist zu kurz für einen langwierigen Wettbewerb, der am Ende eine möglicherweise nur geringfügig bessere E-Kraftstoffoption ermitteln könnte. Um die Etablierung von E-MeOH als vorherrschenden Kraftstoff für den Seeverkehr zu beschleunigen, könnte die EU eine **globale Angebots- und Nachfragepartnerschaft** (GSDP) mit gleichgesinnten Ländern initiieren, welche die Notwendigkeit sehen, die Einführung eines E-Kraftstoffs eher früher als später in Angriff zu nehmen. An dieser Partnerschaft würden Länder mit großen Schifffahrtsflotten und Länder beteiligt sein, die entweder die Technologie für die Umstellung (Schiffe, Motoren, Produktionsanlagen für E-MeOH usw.) liefern könnten oder über natürliche Ressourcen für die Herstellung und Versorgung des Weltmarktes mit E-MeOH verfügen. Die Partnerschaft könnte mit einer kleinen Anzahl von Schlüsselländern beginnen, kann aber ausgeweitet werden, sobald die Partnerschaft eine gewisse globale Wirkung entfaltet und das Interesse anderer Länder an einer Teilnahme geweckt hat.

Eine Beimischungsverpflichtung wäre jedoch am wirksamsten, wenn es global angewandt und daher im Rahmen der IMO festgelegt würde. Da der Prozess zur Verabschiedung einer solchen Verpflichtung auf globaler Ebene wahrscheinlich mehr Zeit in Anspruch nehmen würde, bevor es in Kraft tritt, als eine Verpflichtung in einer Gruppe proaktiver Länder oder Regionen einzuführen, müsste die vorgeschriebene Quote stärker ansteigen, um im Jahr 2050 100% zu erreichen.

5.2 Technologie-offene Roadmap

Die besondere Herausforderung der Seeschifffahrt besteht darin, dass sich – anders als in der Luftfahrt – noch kein dominierender E-Kraftstoff herausgebildet hat. Die Roadmap für E-Methanol beruht auf der Annahme, dass klare politische Vorgaben auf der Grundlage langfristiger Ziele benötigt werden für technologische Entwicklungen, welche Infrastrukturentscheidungen in Bezug auf die globalen Kraftstofflager- und -versorgungskapazitäten mit sich bringen. Die technologieoffene Roadmap hingegen vertraut auf die Marktkräfte, um die beteiligten Unternehmen bei der Wahl der richtigen langfristigen Entscheidung zu leiten. Er erfordert auch langfristige Zielvorgaben von Regierungen und Regulierungsbehörden, doch die angewandten Maßnahmen sind weniger richtungsweisend und haben eher den Charakter von Leitplanken. Die Maßnahmen und Strategien zur Beschleunigung der Einführung von E-Kraftstoffen unterscheiden sich nicht unbedingt grundlegend, sie haben oft nur einen anderen Schwerpunkt.

5.2.1 Nationale Aktivitäten

Langfristiges Ziel ist es, den Übergang von fossilen zu postfossilen Kraftstoffen für Schiffe, die deutsche Häfen anlaufen, zu erleichtern. Um die Machbarkeit dieses Übergangs zu demonstrieren, könnte Deutschland ein **Leuchtturmprojekt** initiieren, in dem solche E-Kraftstoffe hergestellt und eingesetzt werden, um weitere Erfahrungen zu sammeln und die Vor- und Nachteile der verschiedenen Kraftstoffoptionen aus der Praxis zu ermitteln. Zu diesem Zweck würde Deutschland seine Ressourcen, sein Know-how und seinen Einfluss nutzen, F&E- und Pilotprojekte zu beschleunigen, um die vielversprechendsten maritimen E-Kraftstoffe, die optimalen Produktionswege und geografischen Standorte zu ermitteln und die Einführung zu beschleunigen. Gleichzeitig werden Anreize für den Neubau und die Umrüstung von Schiffen geschaffen, während die Zusammenarbeit mit potenziellen Erzeugerländern vertieft, Industriekoalitionen und politische Unterstützung mit den Nachbarn geschmiedet und eine führende Rolle bei der Entwicklung von EU- bzw. globalen Strategien übernommen wird.

Um das industrielle und technische Know-how Deutschlands im Bereich der Schifffahrt und der E-Kraftstoffe zu nutzen und Anreize zu schaffen, könnte die Regierung wettbewerbsorientierte Ausschreibungen für Neubauten und die Umrüstung von Schiffsmotoren durchführen, um die Betriebsleistung der verschiedenen Kraftstoffoptionen zu bewerten und die Well-to-Wake-Emissionen zu quantifizieren. Der Schwerpunkt sollte auf der frühzeitigen Umsetzung einschließlich batterieelektrischer Antriebe oder anderer Wege liegen, mit denen die Emissionsminderung in den deutschen Küstenregionen und in der EU deutlich vor 2030 erreicht werden kann. Daher sollten zunächst Fähren, Roll-on/Roll-off-Schiffe und Serviceschiffe in Betracht gezogen werden. Die Bewertung der E-Kraftstoffoptionen für Hochseeschiffe – Wasserstoff, Ammoniak, Methanol usw. – sollte sich zunächst mehr auf die optimalen Kraftstoffproduktionspfade und -fristen und weniger auf den Einsatz konzentrieren, bis die Perspektiven hinsichtlich der dominierenden Schiffskraftstoffe klarer sind.

Gleichzeitig sollte die deutsche Regierung darauf hinwirken, die Einführung von E-Kraftstoffen durch die Förderung einer globalen Partnerschaft zwischen Angebot und Nachfrage zu beschleunigen, möglicherweise durch den PtX Hub.¹⁷ Die Partnerschaft würde darauf abzielen, sich auf eine gemeinsame Strategie für die Defossilisierung des Seeverkehrs zu einigen. Eine kleine

¹⁷ <https://ptx-hub.org/>.

Gruppe mit den wichtigsten Schifffahrts- und E-Kraftstoff-Lieferländern ist wahrscheinlich effektiver, als das Ziel so viele Länder wie möglich einzubeziehen.

5.2.2 Europäische Politik

Da ein dominierender E-Kraftstoff derzeit nicht in Sicht ist, müsste die EU einen Prozess einleiten, der die weitere technologische Entwicklung der vielversprechendsten E-Kraftstoffoptionen erleichtert und so den Anteil postfossiler Kraftstoffe am Gesamtkraftstoffverbrauch der Seeschifffahrt kontinuierlich zu erhöhen und schließlich einen Anteil von 100% im Jahr 2050 zu erreichen.

Deshalb sollte Europa einen **Standard für die Treibhausgasintensität** einführen. Dieser sollte für alle Schiffe auf allen oder einem Teil ihrer Fahrten gelten, die in den Anwendungsbereich der EU-MRV fallen.¹⁸ Sie müssten nicht nur das 2018 vereinbarte globale Zwischenziel der IMO für 2030 erreichen, die Treibhausgasintensität von Schiffen, um mindestens 40% zu senken, sondern auch das EU-weite Ziel einer Nettoerduktion der Treibhausgase um mindestens 55% bis 2030. Diese Anforderung würde einen starken Schub für postfossile Kraftstoffe bedeuten, da eine solche Reduzierung nicht durch eine Steigerung der technologischen oder betrieblichen Effizienz erreicht werden kann, sondern nur durch eine verstärkte Nutzung postfossiler Kraftstoffe.

Die Einhaltung einer solchen THG-Intensitätspolitik würde nicht auf einem Treibstoffbeimischungsverpflichtung beruhen, die jedes Schiff beim Betrieb innerhalb des MRV-Bereichs erfüllen muss. Um Flexibilität bei der Verwendung von E-Kraftstoffen zu gewährleisten, sollte ein System von E-Kraftstoff-Zertifikaten mit Herkunftsnachweisen (GoO) eingeführt werden. Es würde dem in der E-MeOH-Roadmap (Abschnitt 5.1.2) beschriebenen System ähneln und die Lebenszyklus-Emissionsreduktion jedes E-Kraftstoffs bescheinigen.

Als Ausgangspunkt für den Standard der Treibhausgasintensität würde die durchschnittliche Treibhausgasintensität des unter die MRV-Verordnungen fallenden Verkehrs in den Jahren 2018 und 2019 festgelegt. Von dort aus könnte der Standard mit einer Reduktion von -2% im Jahr 2022 beginnen, auf -10% (2025) und -40% (2030) ansteigen und schließlich -100% im Jahr 2050 erreichen. Der Standard wäre technologieoffen und würde es den Schifffahrtsunternehmen ermöglichen, sich auf technologische und betriebliche Effizienzsteigerungen und/oder E-Kraftstoffe zu konzentrieren.¹⁹ Aufgrund des steilen Rückgangs der Norm werden Effizienzverbesserungen jedoch bald nicht mehr ausreichen, um die Norm zu erfüllen, so dass der Einsatz postfossiler E-Kraftstoffe eine immer attraktivere Option werden würde.

Schiffe, deren Emissionen unter dem Basiswert liegen, würden die Norm zunächst automatisch einhalten. Um die Anforderungen zu erfüllen, können die Schiffsbetreiber die Emissionen durch technische und betriebliche Maßnahmen wie die Erhöhung der Motoreffizienz oder langsames Fahren reduzieren. Darüber hinaus können sie Emissionszertifikate abgeben, die Emissionen oberhalb des Schwellenwerts ausgleichen würden. Diese GoOs müssten von E-Kraftstoff-Herstellern erworben werden, die mit den Einnahmen den Anteil ihrer gesamten Produktionskosten finanzieren, der über dem Marktpreis für fossile Schiffskraftstoffe liegt. Im Gegensatz zur

¹⁸ Verordnung (EU) 2015/757 über die Überwachung, Berichterstattung und Prüfung von Kohlendioxidemissionen aus dem Seeverkehr, (ABL L 123/55 vom 19.5.2015).

¹⁹ Der Standard könnte zum Beispiel in *durchschnittlichen jährlichen CO₂-Emissionen pro Transportarbeit (Masse) [g CO₂/m Tonnen - n Meilen]* gemessen werden, da diese Zahl für mehr als 80% der unter die MRV-Verordnung fallenden Schiffe verfügbar ist.

E-MeOH-Roadmap kämen GoOs aus allen Arten von E-Kraftstoffen für die Einhaltung des Standards in Frage.

5.2.3 Internationale Zusammenarbeit

Um eine globale Anwendbarkeit zu gewährleisten, muss die IMO die zentrale Rolle bei der Entwicklung und **Festlegung globaler Industrienormen** für die Sicherheit, den Umgang, das Bunkern und die Nutzung an Bord sowie den Einsatz künftiger postfossiler Kraftstoffe spielen und mit den Staaten und der ISO bei der Festlegung von Kraftstoffspezifikationen zusammenarbeiten. Diese Regulierungsarbeit ist wichtig, braucht aber Zeit²⁰ und darf nicht durch Unentschlossenheit über die relativen Vorzüge verschiedener E-Kraftstoffoptionen verzögert werden.

Ein Schlüsselement bei der Bewertung der relativen Vorzüge der verschiedenen postfossilen Kraftstoffoptionen für die Schifffahrt und der Planung ihrer Herstellung werden die unterschiedlichen Sicherheits-, Handhabungs-, Produktionsstandards und Zertifizierungsanforderungen sein, die für jeden Kraftstofftyp und seine Mischungen spezifisch sein werden. Um eine beschleunigte weltweite Akzeptanz zu gewährleisten, müssen die erforderlichen Vorschriften im Rahmen von SOLAS und MARPOL vereinbart werden. Dies bedeutet, dass Schiffe, die überall unterwegs sind, Mindeststandards einhalten und sich an lokale Vorschriften halten müssen, die auf der Grundlage globaler Standards eingeführt wurden.

Der technologieoffene Ansatz wird wahrscheinlich zu einer Vielzahl von E-Kraftstoffen und Lösungen führen, lange bevor sich eine potenzielle Dominanz eines E-Kraftstoffs abzeichnet. Dies würde die Kosten aufgrund von Infrastrukturüberschneidungen in die Höhe treiben und verdeutlichen, wie wichtig es ist, beschleunigte Maßnahmen zu ergreifen, um suboptimale Wege und Sackgassen so schnell wie möglich zu ermitteln und auszuschließen. Verstärkte Ansätze der EU und der Mitgliedstaaten zu Technologieoptionen und eine engere internationale Zusammenarbeit können einen wichtigen und notwendigen Beitrag leisten. Um eine solche Zusammenarbeit zu etablieren, könnte die EU eine **Allianz für nachhaltige E-Kraftstoffe für die Seeschifffahrt** (SeAMS) ins Leben rufen, die darauf abzielt die vielversprechendsten E-Kraftstoffe, die den Übergang zur postfossilen Seeschifffahrt vorantreiben würden, zu ermitteln und sich frühzeitig darauf zu einigen.²¹ Diese Partnerschaft würde auf bestehenden Initiativen wie der **Getting to Zero Coalition** aufbauen²² und Länder mit bedeutenden Schifffahrtsflotten einbeziehen sowie Länder, die entweder die Technologie für den Übergang (Schiffe, Motoren, Produktionsanlagen für E-Kraftstoffe usw.) liefern könnten oder über natürliche Ressourcen zur Herstellung und Versorgung des Weltmarkts mit E-Kraftstoffen verfügen. Die Partnerschaft könnte mit einer kleinen Zahl von Schlüsselländern beginnen, könnte aber ausgeweitet werden, sobald die Partnerschaft eine gewisse globale Wirkung entfaltet und das Interesse anderer Länder an einer Teilnahme an der Partnerschaft geweckt hat.

5.3 Vergleich

Abbildung 6 und Abbildung 7 geben einen Überblick über die vorgeschlagenen Initiativen und Aktivitäten, die oben erörtert wurden, sowie über einige Aktivitäten, die oben nicht ausdrücklich erwähnt sind. In den Abbildungen wird zwischen verschiedenen Arten von beteiligten Akteuren

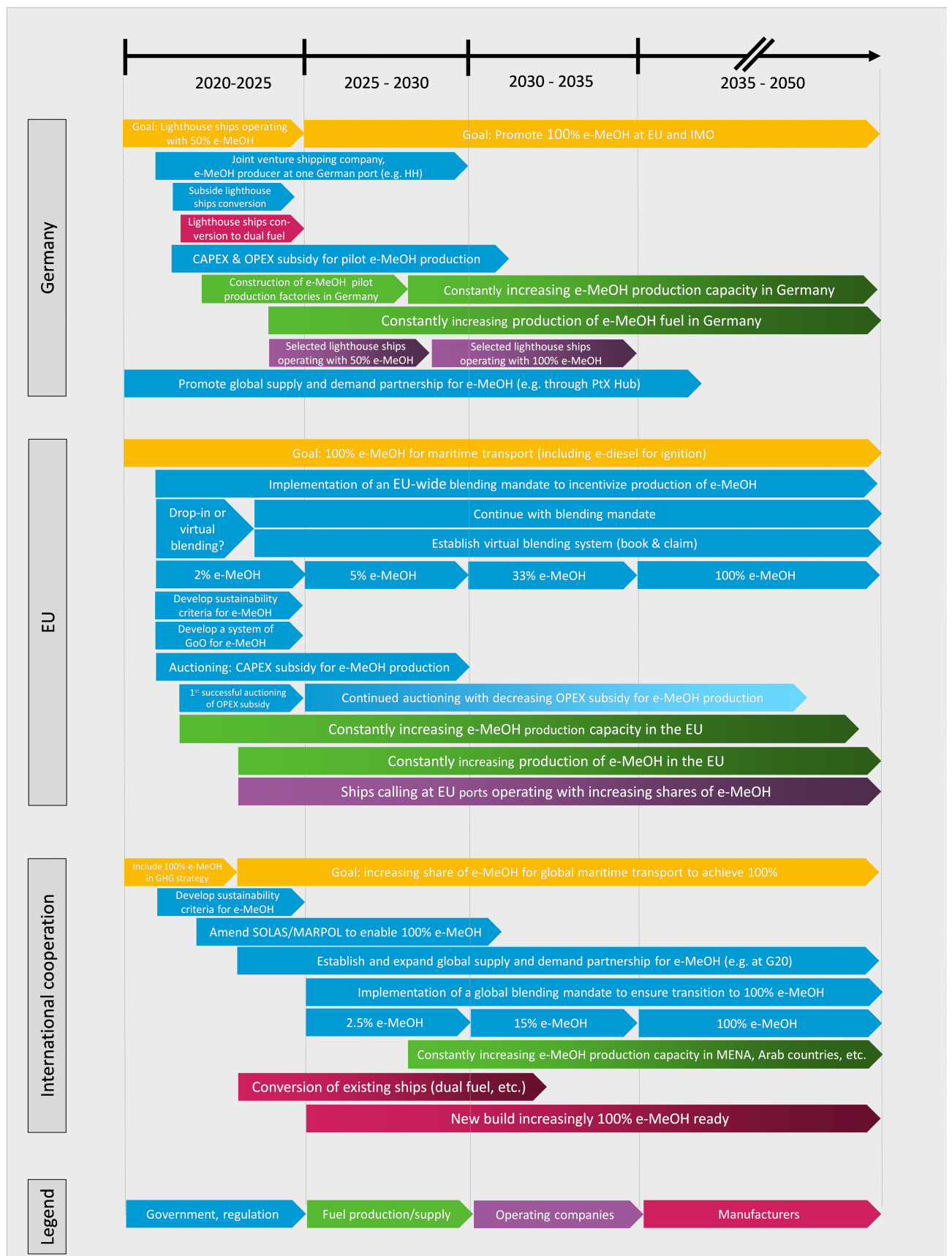
²⁰ Der Schiffssicherheitsausschuss (MSC) der IMO hat beispielsweise mehrere Jahre lang gearbeitet, bevor im Dezember 2020 die vorläufigen Leitlinien für die Sicherheit von Schiffen, die Methyl- oder Ethylalkohol als Kraftstoff verwenden, verabschiedet wurden (IMO 2020b).

²¹ Weitere Einzelheiten darüber, wie sich die SeAMS in eine internationale Strategie zur Förderung synthetischer E-Kraftstoffe in allen schwer abbaubaren Sektoren einfügen würde, finden Sie unter UBA (2021).

²² Die Getting to Zero Coalition wurde 2018 gegründet, umfasst 140 Unternehmen und wird von mehreren Regierungen und der IMO unterstützt, <https://www.globalmaritimeforum.org/getting-to-zero-coalition/>.

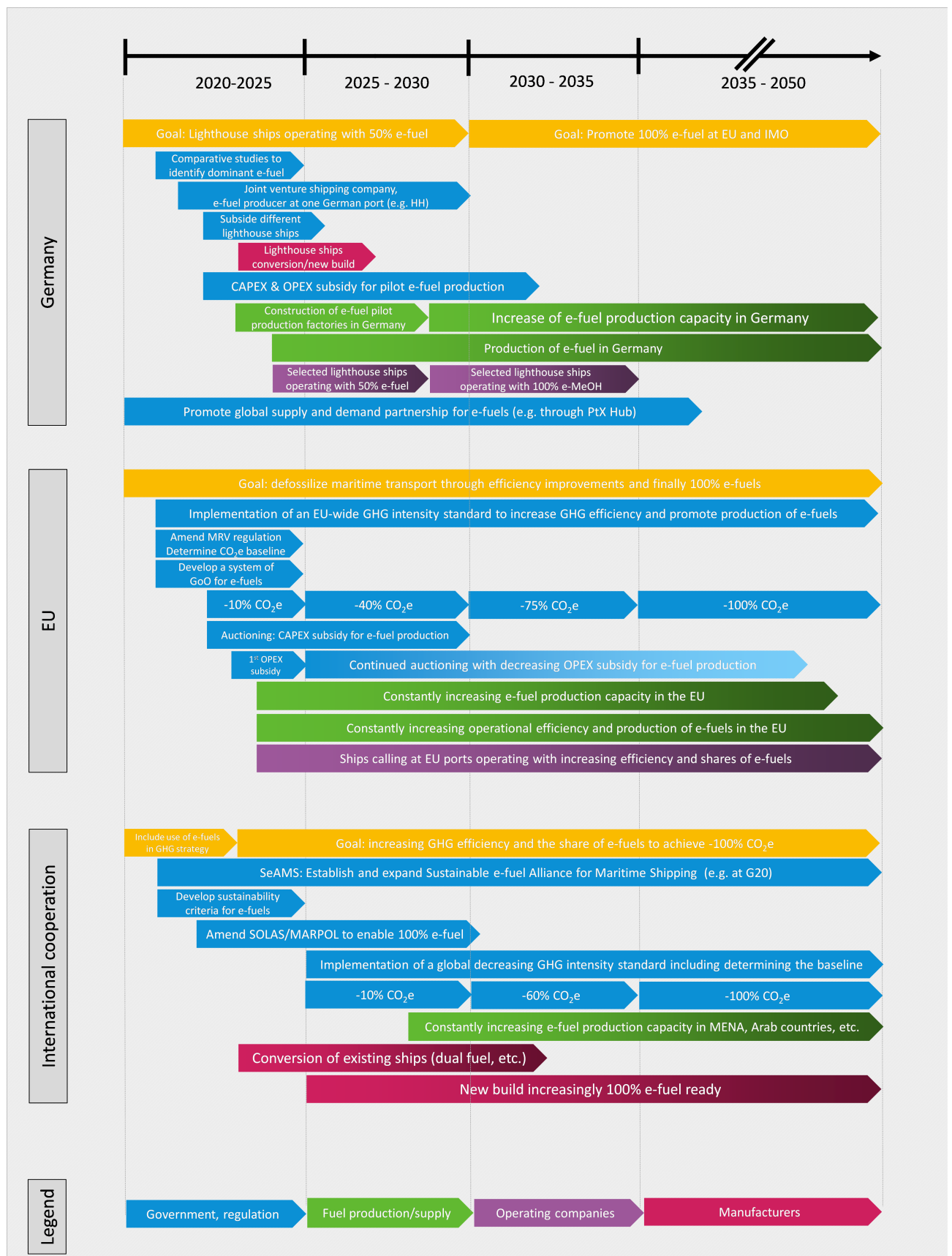
unterschieden: Regierungen, welche die rechtlichen Vorschriften für die Durchführung der erforderlichen Maßnahmen festlegen, Kraftstoffhersteller und -lieferanten, die in Produktionsanlagen und Versorgungsinfrastrukturen investieren und diese betreiben, Schifffahrtsunternehmen, welche die Schiffe betreiben, und Hersteller, die neue Fahrzeuge bauen oder bestehende Fahrzeuge anpassen. Darüber hinaus enthalten die Roadmaps indikative Zielvorgaben, die letztlich politisch diskutiert und vereinbart werden müssen sowie einen indikativen Zeitplan wann die einzelnen Schritte eingeleitet werden müssen und wann sie abgeschlossen sein sollten, um die angestrebten Ziele zu erreichen. Der Beginn der einzelnen Pfeile zeigt an, wann eine Initiative oder Aktivität beginnen sollte, damit sie bis zum Jahr, in dem der Pfeil endet, abgeschlossen ist. Die dunkler werdende Farbe zeigt an, dass die Anstrengungen oder die Stringenz der Intervention im Laufe der Zeit intensiviert werden müssen.

Abbildung 6: Roadmap für E-Methanol



Quelle: Eigene Zusammenstellung

Abbildung 7: Technologioffene Roadmap



Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die Roadmaps verdeutlichen, dass die ersten Schritte auf allen Regulierungsebenen (Deutschland, EU, International) unverzüglich unternommen werden müssen. Die nationalen Regierungen müssen sicherstellen, dass die politischen Maßnahmen, welche Investoren und Betreibern Anreize und Orientierungshilfen bieten, so bald wie möglich verabschiedet werden. Die Jahre bis 2025 sind entscheidend, um die Defossilisierung der Seeschifffahrt bis 2050 zu erreichen. Wenn bis dahin nicht zumindest auf nationaler und europäischer Ebene geeignete Maßnahmen ergriffen werden, wird es schwierig sein dieses Ziel zu erreichen.

Die technologieoffene Roadmap (Abbildung 7) ähnelt in gewisser Weise der Roadmap für E-Methanol (Abbildung 7). Dies liegt vor allem daran, dass dieser dieselben Regulierungsebenen und Akteure abdeckt. Es gibt jedoch erhebliche Unterschiede, vor allem in Bezug auf die politischen Maßnahmen, mit denen die Defossilisierung der Seeschifffahrt bis 2050 erreicht werden soll. Während sich die E-MeOH-Roadmap auf den Übergang zu postfossilen Kraftstoffen durch eine Beimischungspflicht konzentriert, bietet die technologieoffene Roadmap Raum für verschiedene Arten von E-Kraftstoffen und gleichzeitige Effizienzsteigerungen. Auch wenn die Feststellung länger dauern kann, welche(r) E-Kraftstoff(e) effizienter ist/sind, müssen die Regulierungsentscheidungen zur Bereitstellung von Leitlinien und Anreizen, um die effizienteste Option zur Förderung der beschleunigten Einführung zu ermitteln, frühzeitig getroffen werden.

Im Gegensatz zur Luftfahrt, für welche E-Kerosin von fast allen Beteiligten als der Kraftstoff der Zukunft angesehen wird, hat sich für die Seeschifffahrt noch kein dominierender E-Kraftstoff herauskristallisiert. Vielmehr werden mehrere vielversprechende Kraftstoffe in Betracht gezogen, von denen einige sogar in verschiedenen Antriebssystemen eingesetzt werden sollen. Alle Optionen haben bestimmte Vor- und Nachteile, u. a. hinsichtlich der Bereitschaft der Produktionstechnologie, des Treibhausgasreduzierungsspotenzials, der Kosten, der Gesamteffizienz der Umwandlung, der Handhabung, der Sicherheit, der Umweltrisiken, der Wiederverwendung bestehender Infrastruktur usw. E-Methanol ist technologisch ausgereift und würde nur vergleichsweise wenige Änderungen an der Fahrzeug- und Versorgungsinfrastruktur erfordern, dürfte aber teurer sein, da seine Herstellung nicht-fossiles CO₂ als Input erfordert. E-Wasserstoff und E-Ammoniak sind kohlenstofffrei und können daher langfristig bevorzugt werden, wobei ihre Entwicklung von der Lösung nicht unerheblicher Probleme bei der Lagerung und Handhabung an Bord abhängt. Darüber hinaus hängt die Entwicklung aller E-Kraftstoffe in erheblichem Maße von der Senkung der Produktionskosten für grünen Wasserstoff ab. Daher ist es derzeit unmöglich vorherzusagen, welche dieser technologischen Optionen die effizienteste ist.

Es liegt auf der Hand, dass sich die politischen Entscheidungsträger derzeit in einem schwierigen Dilemma befinden. Der Übergang zur Defossilisierung des Seeverkehrs sollte bis 2050 vollzogen sein. Es ist jedoch weder ein dominierender E-Kraftstoff noch eine begrenzte Anzahl praktikabler E-Kraftstoffe in Sicht. Für bestimmte Optionen, wie E-Ammoniak oder E-Wasserstoff, haben die Tests gerade erst begonnen und es könnte bis 2025 dauern, bis die praktische Machbarkeit dieser postfossilen Kraftstoffe für die Hochseeschiffe nachgewiesen ist.

Jede der vielversprechenden E-Kraftstoff-Optionen ist mit erheblichen Herausforderungen verbunden und es ist ungewiss, welche davon eher früher als später bewältigt werden können:

- ▶ E-Methanol ist relativ einfach zu handhaben und zu lagern, würde zwar eine Nachrüstung der bestehenden Infrastruktur und Fahrzeuge erfordern, aber eine weitere Nutzung der bestehenden Technologie ermöglichen. Für seine Herstellung ist jedoch nicht-fossiles CO₂, z. B. aus direkter Luftabscheidung (DAC), erforderlich und es ist ungewiss, ob DAC in großem Maßstab und zu wettbewerbsfähigen Kosten verfügbar sein wird.

- ▶ E-Ammoniak benötigt kein CO₂, sondern Stickstoff, der vergleichsweise einfach aus der Umgebungsluft gewonnen werden kann. Ammoniak ist jedoch giftig und schwieriger zu handhaben und würde daher grundlegendere Änderungen an der bestehenden Infrastruktur und den Fahrzeugen erfordern, was auch zu höheren Kapazitätsverlusten führen würde. Außerdem gibt es noch keine mit Ammoniak betriebenen Schiffsmotoren.
- ▶ E-Wasserstoff wird langfristig wahrscheinlich die billigste E-Option sein. Sie steht jedoch vor ähnlichen Herausforderungen wie E-Ammoniak in Bezug auf die Infrastruktur und die Fahrzeuge und es könnte noch länger dauern, bis die technischen Probleme gelöst sind.
- ▶ E-Diesel dürfte in Bezug auf die Produktionskosten der bei weitem teuerste E-Kraftstoff bleiben, da er zusätzliche Umwandlungsschritte erfordert, die den Gesamtwirkungsgrad von der Quelle bis zum Tank verringern. Wenn jedoch Synergien mit anderen Sektoren – insbesondere dem Luftverkehr – mobilisiert werden könnten, ließe sich der Kostenunterschied weiter verringern.

Die parallele Entwicklung von zwei oder mehreren E-Kraftstoff-Optionen kann zwar teuer sein, entweder aufgrund versunkener Kosten oder aufgrund von Größenvorteilen, auf die verzichtet werden muss, aber es könnte geprüft werden, ob sie nacheinander entwickelt werden könnten. E-Wasserstoff könnte die besten langfristigen Aussichten haben, würde aber als bewährte Technologie zu spät in den erforderlichen Mengen zur Verfügung stehen. E-Methanol oder E-Ammoniak könnten früher zur Verfügung stehen, was bedeutet, dass sie als eine begrenzte "Brücke" von fossilen Schiffskraftstoffen zu E-Wasserstoff verfolgt werden können.

Jede Entscheidung, den Übergang zu postfossilen Kraftstoffen im Seeverkehr zu beschleunigen, ist natürlich mit größeren Unsicherheiten behaftet als in anderen Sektoren. Angesichts dieser Unwägbarkeiten erscheinen die folgenden Maßnahmen dennoch sinnvoll:

- ▶ Auf EU-Ebene sollte so bald wie möglich eine technologieoffene E-Kraftstoffverpflichtung auf der Grundlage von Herkunftsnachweisen (GoO) für einen begrenzten Zeitraum, z. B. bis 2030, eingeführt werden. Der Hauptzweck dieser Verpflichtung besteht darin, Anreize für Pilotprojekte zu schaffen, welche Schiffe, Bunkerinfrastrukturen und die Herstellung von E-Kraftstoffen einschließen, um ihre praktische Durchführbarkeit zu beweisen und um bis spätestens 2030 einen oder eine begrenzte Anzahl von dominierenden E-Kraftstoffen zu ermitteln. Darüber hinaus würde mit diesem Ansatz bereits die Verwaltung geschaffen, die erforderlich ist, um die Einführung des/der vorherrschenden Kraftstoffs/Kraftstoffe nach dieser technologieoffenen Phase zu fördern.
- ▶ Auf nationaler Ebene sollte dieser Identifizierungsprozess durch Leuchtturmprojekte unterstützt werden, die "Learning by doing" ermöglichen und die praktische Durchführbarkeit von E-Fuels veranschaulichen.
- ▶ Auf multilateraler Ebene sollte die oben erwähnte SeAMS zur Koordinierung von Aktivitäten zur Förderung der verstärkten Einführung von E-Kraftstoffen in der Seeschifffahrt initiiert werden. Eine der ersten gemeinsamen Bemühungen dieses Bündnisses sollte darin bestehen, eine vergleichende Szenarioanalyse der vielversprechendsten E-Kraftstoff-Optionen für die Schifffahrt durchzuführen, mit dem Ziel, so bald wie möglich den/die vorherrschenden Kraftstoff/Kraftstoffe für die Schifffahrt zu ermitteln.
- ▶ Die Förderung des Ausbaus von Elektrolyseur- und Stromerzeugungskapazitäten aus erneuerbaren Energien kann als unumstößliche Strategie zur Förderung jedes E-Kraftstoffs für den Seeverkehr angesehen werden. Denn alle E-Kraftstoffe erfordern die Erzeugung von E-

Wasserstoff aus erneuerbaren Energien. Glücklicherweise haben viele Länder bereits seit vielen Jahren Maßnahmen zur Förderung von Strom aus erneuerbaren Energien ergriffen und in jüngster Zeit auch Strategien für die Erzeugung von Elektro-Wasserstoff entwickelt. Angesichts der enormen Kapazitäten, die für den Seeverkehr und andere Zwecke benötigt werden, um den Übergang zu vollziehen, müssen diese Strategien jedoch kontinuierlich ausgebaut werden.

Abgesehen von diesen Aktivitäten besteht das Hauptziel für den nächsten Zeitraum darin, die Zahl der in diesem Sektor verwendeten E-Kraftstoffe zu begrenzen. Solange ein solcher dominierender Kraftstoff oder solche Kraftstoffe nicht von einer kritischen Masse von Ländern unterstützt wird/werden, wird es kaum möglich sein, die für den Übergang erforderliche Dynamik der Größenvorteile auszulösen.

Diese Empfehlung könnte als Widerspruch zu dem vorherigen Vorschlag verstanden werden, sich auf einen E-Kraftstoff zu konzentrieren und nicht zu warten, bis die Marktdynamik weniger wettbewerbsfähige Kraftstoffe verdrängt. Dies setzt jedoch voraus, dass der ausgewählte E-Kraftstoff von einer kritischen Masse von Ländern und Interessengruppen gefördert wird. In der Phase, in der die Kräfte gebündelt werden und man sich auf den E-Kraftstoff der Zukunft einigt, kann die Marktdynamik dazu beitragen, die technologischen und wirtschaftlichen Herausforderungen der einzelnen E-Kraftstoff-Optionen weiter zu ermitteln.

Die Förderung von E-Treibstoffen kann Synergien zwischen der Seeschifffahrt und anderen Sektoren, die dekarbonisiert werden müssen, mobilisieren. Zum Beispiel E-Wasserstoff für die Stahlproduktion, E-Kerosin für die Luftfahrt oder E-Ammoniak und E-Methanol als Input für Produkte der chemischen Industrie. Auch wenn der maritime Sektor im Vergleich zu anderen Sektoren ein Nachzügler ist, kann er von der Entwicklung von Prozessen profitieren, die für die Herstellung des/der dominierenden E-Kraftstoffs/Kraftstoffe erforderlich sind und in anderen Sektoren bereits erreicht wurden. Diese Synergien können jedoch zu Konflikten führen, wenn das Angebot an diesen E-Kraftstoffen nicht mit der Gesamtnachfrage aller Sektoren Schritt hält.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Eindämmung des Klimawandels und die Erreichung des im Pariser Abkommen vereinbarten globalen Temperaturziels erfordern Anstrengungen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren, auch im Luft- und Seeverkehr. Neben einer erheblichen Steigerung der technologischen und betrieblichen Effizienz und einer Verringerung der Nachfrage nach diesen Verkehrsdienstleistungen durch eine Verlagerung auf andere Verkehrsträger oder mehr lokale Produktion und lokaler Verbrauch, spielt die Substitution fossiler Kraftstoffe durch nachhaltig erzeugte E-Kraftstoffe eine zentrale Rolle bei der Erreichung dieses Ziels. Da deren Technologie jedoch noch nicht ausgereift ist und die Kosten derzeit um den Faktor 3 bis 4 höher sind als bei fossilen Kraftstoffen, ist die Einleitung und Umsetzung des Übergangs zu 100% E-Kraftstoffen eine komplexe und anspruchsvolle Aufgabe.

In dieser Studie haben wir Roadmaps für die Defossilisierung des Luft- und Seeverkehrs durch den Übergang zu nachhaltig erzeugten postfossilen E-Kraftstoffen entwickelt und bewertet. Die Roadmaps beinhalten Aktivitäten auf verschiedenen regulatorischen Ebenen (Deutschland, EU, international) und unterschiedlich betroffenen Stakeholdern (Betreiber, Kraftstoffproduzenten/-lieferanten, Hersteller). Wir haben die Eignung von politischen Instrumenten zur Erreichung dieses Ziels analysiert.

In Anbetracht der Komplexität ist zu beachten, dass die beschriebenen Roadmaps nur einen Teil der Vielzahl möglicher Roadmaps in der Praxis darstellen. Jede skizzierte Aktivität könnte si-

cherlich modifiziert werden, wodurch sich die Zusammensetzung der Roadmap ändern würde. Trotz dieser Einschränkung ermöglichen es die Roadmaps, Zusammenhänge zwischen den Aktivitäten der verschiedenen Akteure auf den unterschiedlichen Regulierungsebenen zu erkennen.

Bei der Versorgung mit E-Kraftstoffen gibt es erhebliche Unterschiede zwischen dem Luft- und dem Seeverkehr. Während E-Kerosin als zukünftiger Kraftstoff für die Luftfahrt weitgehend akzeptiert ist, hat sich ein solcher dominierender Kraftstoff für den Seeverkehr noch nicht herauskristallisiert. Vor diesem Hintergrund lauten unsere wichtigsten Empfehlungen:

- ▶ Die Koordinierung politischer Initiativen auf globaler Ebene wäre am effektivsten, um die Defossilisierung beider Sektoren zu erreichen. Die Erzielung hinreichend ehrgeiziger Vereinbarungen in der IMO und der ICAO würde jedoch wahrscheinlich mehr Zeit in Anspruch nehmen, als für die Erreichung der Temperaturziele des Pariser Abkommens zur Verfügung steht.
- ▶ Vorläuferaktivitäten auf nationaler (Deutschland) oder regionaler Ebene (gleichgesinnte europäische Staaten, EU) werden den Fortschritt auf internationaler Ebene wahrscheinlich beschleunigen.
- ▶ Die Durchführung von "Leuchtturmprojekten", welche die praktische Durchführbarkeit der vollständigen Einführung von E-Kraftstoffen demonstrieren, kann den Übergang auf breiterer Ebene einleiten.
- ▶ Für den Luftverkehr ist ein Drop-in-Beimischungspflicht auf europäischer Ebene eine praktikable Option, welche die verstärkte Einführung von E-Kerosin auf einem der wichtigsten globalen Luftverkehrsmärkte auslösen und sicherstellen würde. Allerdings müssen die möglichen Wettbewerbsauswirkungen einer solchen Verpflichtung berücksichtigt werden.
- ▶ Für die Schifffahrt ist es noch zu früh, den/die dominierenden E-Kraftstoff(e) zu bestimmen. Das Hauptziel einer Übergangsstrategie sollte daher darin bestehen, die Zahl der möglichen Optionen zu reduzieren, vorzugsweise auf einen dominierenden E-Kraftstoff. Auf EU-Ebene kann dieser Prozess durch eine technologieoffene E-Kraftstoff-Verpflichtung unterstützt werden, das so bald wie möglich in eine spezifische Verpflichtung für einen E-Kraftstoff umgewandelt werden sollte.
- ▶ Wasserstoff ist eine unverzichtbare Option für alle E-Kraftstoffe und bei der Ausweitung der Produktion von E-Kraftstoffen für die Luft- und Schifffahrt könnten sich Synergien ergeben, wenn beispielsweise Zwischen- oder Nebenprodukte der E-Kerosin-Produktion auch für die Erzeugung von E-Kraftstoffen für die Schifffahrt verwendet würden.
- ▶ Um technologisches Lernen bei der Herstellung von E-Kraftstoffen auszulösen, muss die Einführung dieser Kraftstoffe frühzeitig subventioniert werden. Dies wird die Ausweitung der Erzeugungskapazitäten erleichtern und die Produktionskosten senken. Da alle potenziellen E-Kraftstoffe für den Luft- und Seeverkehr auch in anderen Sektoren als Kraftstoffe oder Rohstoffe verwendet werden, ist die Förderung eines solchen Übergangs eine Politik, die nicht bereut wird. Daher sollten die Defossilisierungskonzepte anderer Sektoren idealerweise mit den Roadmaps für den Luft- und Seeverkehr verknüpft werden, um ein optimiertes Gesamtkonzept zu erstellen. Auf diese Weise könnten die Kosten der Umstellung auf alle Sektoren umgelegt werden, welche sich der Herausforderung der Defossilisierung zeitgleich stellen.

- ▶ Solange Maßnahmen zur Steigerung der Verbreitung von E-Kraftstoffen nicht auf globaler Ebene ergriffen werden, könnten Subventionen für die Produktion oder den Verbrauch von E-Kraftstoffen erforderlich sein, um gleiche Wettbewerbsbedingungen wie für fossile Kraftstoffe zu schaffen, die anderswo verwendet werden.
- ▶ Die Bemühungen um die Festlegung von Maßnahmen zur Beschleunigung der Einführung von E-Kraftstoffen im Rahmen der ICAO und der IMO, einschließlich von E-Kraftstoff-Beimischungspflichten und marktbasierter Maßnahmen, müssen unverzüglich intensiviert werden. Darüber hinaus müssen Prozesse eingeleitet werden, um sicherzustellen, dass die globalen Kraftstoffsicherheitsstandards weiterentwickelt werden, um die Verwendung von E-Kraftstoffen zu ermöglichen.
- ▶ Es sollte eine strategische Partnerschaft zwischen einer kritischen Masse von Schlüsselländern und -akteuren initiiert werden. Eine solche Initiative könnte mit einer kleinen Anzahl von Ländern beginnen, die über einen bedeutenden Marktanteil in der Luft- oder Schifffahrt verfügen und die sich wahrscheinlich auf eine gemeinsame Strategie einigen werden, die möglicherweise von künftigen E-Kraftstoff-Lieferländern begleitet wird. Andere Länder könnten sich der Initiative später anschließen, sofern sie mit den Grundsätzen und Zielen der Initiative einverstanden sind. Für die Schifffahrt bestünde das Hauptziel einer solchen Initiative darin, sich so bald wie möglich und spätestens bis 2025 auf einen dominierenden E-Kraftstoff (vorzugsweise nur einen) zu einigen.

Unsere Bewertung zeigt, dass die ersten Schritte sofort auf allen Regulierungsebenen unternommen werden müssen. Die nationalen Regierungen müssen sicherstellen, dass die politischen Maßnahmen, welche Investoren und Betreibern Anreize und Orientierungshilfen bieten und politische Initiativen auf europäischer und internationaler Ebene aktiv unterstützen, so schnell wie möglich verabschiedet werden. Die Jahre bis 2025 sind entscheidend, um die Defossilisierung des Luft- und Seeverkehrs zu erreichen. Wenn bis dahin nicht zumindest auf nationaler und europäischer Ebene geeignete politische Maßnahmen ergriffen werden, wird es schwierig sein das Ziel der Defossilisierung bis 2050 zu erreichen.

7 Referenzen

- AVW - Agora Verkehrswende; AEW - Agora Energiewende; FE - Frontier Economics (2018). Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Agora Verkehrswende; Agora Energiewende; frontier economics. Berlin, 2018. Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf, letzter Zugriff am 16. Mai 2021.
- Baumol, W. J. (2002): Die Innovationsmaschine des freien Marktes: Eine Analyse des Wachstumswunders des Kapitalismus: Princeton University Press.
- Brynnolf, S.; Taljegard, M.; Grahn, M.; Hansson, J. (2017): Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. Göteborg, 2017.
- CE Delft (2019): Faber, J.; Lee, D. S. Update of maritime greenhouse gas emission projections. CE Delft, 2019. Online verfügbar unter <https://www.cedelft.eu/en/publications/download/2698>, letzter Zugriff am 31. Januar 2021.
- CRI - Carbon Recycling International (2020): Projekte: Emissions-to-Liquids Technology, Carbon Recycling International. Online verfügbar unter <https://www.carbonrecycling.is/projects#projects-mefco2>, zuletzt aktualisiert am 25. Dezember 2020, letzter Zugriff am 25. Dezember 2020.
- CTH - Chalmers University of Technology; IVL - Swedish Environmental Research Institute (2017): Brynnolf, S.; Taljegard, M.; Grahn, M.; Hansson, J. Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. Chalmers University of Technology; Swedish Environmental Research Institute. Göteborg, 2017.
- DECHEMA - Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (Hrsg.) (2019). Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien, Nachhaltigkeitseffekte - Potenziale Entwicklungsmöglichkeiten. 2. Roadmap des Kopernikus-Projektes „Power-to-X“: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X), 2019.
- dena - Deutsche Energie-Agentur GmbH; LBST - Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (2017): Siegemund, S.; Trommler, M.; Kolb, O.; Zinnecker, V.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Zittel, W.; Raksha, T.; Zerhusen, J. E-Fuels Study: Das Potenzial von strombasierten Kraftstoffen für einen emissionsarmen Verkehr in der EU, Ein Gutachten von LBST und dena. Deutsche Energie-Agentur GmbH; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Verband der Automobilindustrie (Hrsg.). Berlin, 2017.
- DNV GL (2017a). Low Carbon Shipping Towards 2050. DNV GL, 2017. Online verfügbar unter C:\Users\m.cames\Documents\Download\DNV_GL_Low_Carbon_Shipping_Towards_2050.pdf, letzter Zugriff am 15. Mai 2021.
- DNV GL (2017b): Maritime Prognose bis 2050, Energy Transition Outlook 2017, 2017. Online verfügbar unter <https://eto.dnvgl.com/2017/maritime>, letzter Zugriff am 28. September 2018.
- DNV GL (2020). Maritime Prognose bis 2050, Energy Transition Outlook 2020. DNV GL, 2020. Online verfügbar unter https://brandcentral.dnvgl.com/dloriginal/gallery/10651/files/original/b3002f4841aa463abdd4a9b469b1ed08.pdf?f=DNVGL_2020_Maritime_Forecast_to_2050_WEB.pdf, letzter Zugriff am 24. Oktober 2020.
- Dow (2020). L3G 06.05.C.10 - Industriell reinigen, Bijlage 8 Ignition Energy. Dow, 2020. Online verfügbar unter <https://nl.dow.com/content/dam/corp/documents/ehs/779-07309-06-l3g-06-05-c-10-industriell-reinigen-bijlage-8-ignition-energy.pdf>, letzter Zugriff am 9. April 2021.
- Ecoinvent Centre (2018). ecoinvent database v3.5. Ecoinvent-Zentrum. Ecoinvent-Zentrum (Hrsg.), 2018.
- FCH - Fuel Cells and Hydrogen (2019): Start von Refhyne, der weltgrößten Elektrolyseanlage in der Rheinland Raffinerie, Fuel Cells and Hydrogen. Online verfügbar unter <https://www.fch.europa.eu/news/launch-refhyne-worlds-largest-electrolysis-plant-rhineland-refinery>, zuletzt aktualisiert am 4. März 2019, letzter Zugriff am 4. März 2019.
- Horvath, S.; Fasihi, M.; Breyer, C. (2018): Techno-ökonomische Analyse eines dekarbonisierten Schifffahrtssektors: Technologievorschläge für eine Flotte im Jahr 2030 und 2040. In: *Energy Conversion and Management* (164), S. 230-241.
- i-deals (2016). MeFCO2 - Methankraftstoff aus CO₂, Synthese von Methanol aus abgetrenntem Kohlendioxid unter Verwendung von überschüssigem Strom. i-deals, 2016. Online verfügbar unter <http://www.mefco2.eu/pdf/mefco2-teaser.pdf>, letzter Zugriff am 25. Dezember 2020.
- IEA - Internationale Energieagentur (2021): Global electrolysis capacity becoming operational annually, 2014-2023, historical and announced - Charts - Data & Statistics - IEA, International Energy Agency. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electrolysis-capacity-becoming-operational-annually-2014-2023-historical-and-announced>, zuletzt aktualisiert am 18. Juni 2020, letzter Zugriff am 26. März 2021.

- IFA - Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (2021): GESTIS-Stoffdatenbank, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. Online verfügbar unter <https://gestis-database.dguv.de/>, letzter Zugriff am 9. April 2021.
- ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung (2019): Fröhlich, T.; Blömer, S.; Münter, D.; Brischke, L.-A. CO₂-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland - Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit (ifeu paper, 03/2019). Institut für Energie- und Umweltforschung, 2019.
- IMO - Internationale Seeschiffahrtsorganisation (2009). Zweite IMO-THG-Studie 2009. Internationale Seeschiffahrtsorganisation. London, 2009. Online verfügbar unter <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/SecondIMOGHGStudy2009.pdf>, letzter Zugriff am 28. September 2018.
- IMO - Internationale Seeschiffahrtsorganisation (2020). Vierte IMO-THG-Studie 2020, Reduzierung der Treibhausgasemissionen von Schiffen (MEPC 75/7/15). Internationale Seeschiffahrtsorganisation. London, 2020. Online verfügbar unter <https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=125134>, letzter Zugriff am 24. Oktober 2020.
- IWES - Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (2017): Pfennig, M.; Gerhardt, N.; Pape, C.; Böttger, D. Mittel- und Langfristige Potenziale von PtL und H₂-Importen aus internationalen EE-Vorzugsregionen, Teilbericht im Rahmen des Projekts: Klimawirksamkeit Elektromobilität - Entwicklungsoptionen des Straßenverkehrs unter Berücksichtigung der Rückkopplung des Energieversorgungssystems im Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik. Kassel, 2017.
- Methanol-Institut (2020). Kommentare zur anfänglichen Folgenabschätzung der EU-Initiative „Fuel EU Maritime“. Methanol Institute, 24 Apr 2020. Online verfügbar unter [blob:https://ec.europa.eu/569a018e-e2dc-4938-8a11-f51e3c405c6b](https://ec.europa.eu/569a018e-e2dc-4938-8a11-f51e3c405c6b), letzter Zugriff am 20. Oktober 2020.
- MWV - Mineralölwirtschaftsverband e.V.; IWO - Institut für Wärme und Oeltechnik e.V.; MEW - Mittelständische Energiewirtschaft Deutschland e.V.; UNITI - Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e.V. (2018): Hobohm, J.; Maur, A. auf der; Dambeck, H.; Kemmler, A.; Koziel, S.; Kreidelmeyer, S.; Piégsa, A.; Wendring, P.; Meyer, B.; Apfelbacher, A.; Dotzauer, M.; Zech, K. Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende, Endbericht. Mineralölwirtschaftsverband e.V.; Institut für Wärme und Oeltechnik e.V.; Mittelständische Energiewirtschaft Deutschland e.V.; Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e.V. Berlin, 2018.
- NPM, AG 1 - Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 1 (2020). Werkstattbericht Alternative Kraftstoffe, Klimawirkungen und Wege zum Einsatz Alternativer Kraftstoffe. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 1, 2020. Online verfügbar unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM_AG1_Werkstattbericht_AK.pdf.
- Oeko-Institut (2019): Kasten, P.; Heinemann, C. Kein Selbstläufer: Klimaschutz und Nachhaltigkeit durch PtX, Diskussion der Anforderungen und erste Ansätze für Nachweiskriterien für eine klimafreundliche und nachhaltige Produktion von PtX-Stoffen. Impulspapier im Auftrag des BUND im Rahmen des Kopernikus-Vorhabens „P2X“. In Zusammenarbeit mit Seebach, D. und Sutter, J. Oeko-Institut, 2019.
- Pechstein, J.; Bullerdiel, N.; Kaltschmitt, M. (2020): Ein „Book and Claim“-Ansatz zur Berücksichtigung nachhaltiger Flugkraftstoffe im EU-ETS - Entwicklung eines Grundkonzepts. In: *Energy Policy* 136, S. 111014. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.111014.
- Prognos - Prognos AG (2020): Kreidelmeyer, S.; Dambeck, H.; Krichner, A.; Wünsch, M. Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Prognos AG, 2020. Online verfügbar unter <C:\Users\m.cames\Documents\Download\transformationspfade-fuer-strombasierte-energietraeger.pdf>, letzter Zugriff am 16. Mai 2021.
- thinkstep AG (Hrsg.) (2018). GaBI 6.0, 2018.
- TRIS - Technical Research Institute of Sweden (2015): Blomqvist, P.; Evegren, F.; Willstrand, O.; Arvidson, M. preFLASH, Preliminary study of protection against fire in low-flashpoint fuel. Technical Research Institute of Sweden, 2015. Online verfügbar unter <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962918/FULLTEXT01.pdf>, letzter Zugriff am 1. Februar 2021.
- UBA - Umweltbundesamt (2019a): Katja Purr, Jens Günther, Harry Lehmann und Philip Nuss. Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - Rescue Studie. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, 2019. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf, zuletzt abgerufen am 5. Mai 2020.
- UBA - Umweltbundesamt (2019b): Lauf, T.; Memmler, M.; Schneider, S. Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger, Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018 (Climate Change, 37/2019). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau,

2019. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-07_cc-37-2019_emissionsbilanz-erneuerbarer-energien_2018.pdf, letzter Zugriff am 2. Mai 2021.
- UBA - Umweltbundesamt (2020): Liebich, A.; Fröhlich, T.; Münter, D.; Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Dünnebeil, F.; Knörr, W.; Biemann, K.; Simon, S.; Maier, S.; Albrecht, F.; Pregger, T. et al. Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien (Texte, 68/2020). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, 2020. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_2020_68_systemvergleich_speicherbarer_energetraeger_aus_erneuerbaren_energien.pdf, letzter Zugriff am 2. Mai 2021.
- UBA - Umweltbundesamt (2021): Cames, M.; Böttcher, H.; Fuentes, U.; Wilson, R. Optionen für die internationale Zusammenarbeit zur Schließung der 2030-Klimaambitionsücke, Politikfeld synthetische E-Kraftstoffe (Climate Change, 02/2021). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, 2021. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021_01_07_cc_02-2021_policy_paper_multilateral_initiatives_synthetic_e-fuels.pdf, letzter Zugriff am 2. Mai 2021.
- WHO - Weltgesundheitsorganisation (2021): Internationally Peer Reviewed Chemical Safety Information (INCHEM), Weltgesundheitsorganisation. Online verfügbar unter <http://www.inchem.org/#/search>, letzter Zugriff am 9. April 2021.