

Für Mensch und Umwelt

November 2021

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

Strategiepapier Luftfahrt

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

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	3
Abkürzungsverzeichnis.....	4
1 Einführung.....	5
1.1 Herausforderungen.....	5
1.2 Schwerpunkt und Umfang.....	6
1.3 Struktur.....	8
2 Energiebedarf.....	8
2.1 Prognosen zum Verkehrswachstum.....	9
2.2 Effizienz-Projektionen.....	10
2.3 Prognosen zur Energienachfrage.....	12
3 Handlungsfelder.....	15
3.1 Barrieren.....	15
3.2 Politische Instrumente.....	16
4 Optionen für die postfossile Energieversorgung.....	18
4.1 Technischer und marktbezogener Status quo.....	18
4.2 Produktionskosten und Preise.....	20
4.3 Treibhausgasreduzierungs­potenzial.....	22
4.4 Gesamtwirkungsgrad der Umwandlung.....	24
4.5 Zusammenfassung.....	26
5 Roadmap zur Erreichung von Null-Emissionen.....	27
5.1 Inländisches Vorzeigeprojekt.....	28
5.2 Europäische Politik.....	29
5.3 Internationale Zusammenarbeit.....	31
5.4 Übersicht.....	32
6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	34
7 Referenzen.....	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anteil der Luftfahrt am weltweiten Ölverbrauch (2018)	9
Abbildung 2:	Jährliche Wachstumsraten bei den Passagierkilometern in ausgewählten Prognosen	10
Abbildung 3:	Energieeffizienz in der weltweiten Passagierluftfahrt	12
Abbildung 4:	Projektion für den weltweiten Energiebedarf in der Luftfahrt	14
Abbildung 5:	Haupthindernisse für die Einführung von E-Kraftstoffen im Luftverkehr	16
Abbildung 6:	Produktionsschritte für verschiedene E-Kraftstoffe.....	19
Abbildung 7:	Verschiedene Produktionskostenszenarien für die Herstellung von flüssigem E-Kraftstoff an einem günstigen Standort für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (MENA-Region)	21
Abbildung 8:	THG-Emissionen der Produktion von flüssigen E-Kraftstoffen und E-Wasserstoff in Abhängigkeit von der THG-Intensität des Stromeinsatzes	22
Abbildung 9:	Überblick über die verschiedenen Prozessketten von E-Fuel	24
Abbildung 10:	Auswirkungen einer allmählich steigenden Beimischungsquote auf die Ticketpreise unter verschiedenen Annahmen für Energieeffizienzverbesserungen bis zum Jahr 2050.....	30
Abbildung 11:	Fahrplan für die Luftfahrt	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wachstum der weltweiten Luftverkehrsnachfrage und Schätzung des Wachstums der Energienachfrage.....	13
Tabelle 2:	Vergleich des technischen Stands und des kurzfristigen Potenzials von E-Kraftstoffen	20
Tabelle 3:	Umwandlungswirkungsgrad von Strom in Endenergieträger für verschiedene E-Kraftstoffe	25
Tabelle 4:	Bewertung der Wirkungskategorien für verschiedene E- Kraftstoffe (langfristige Perspektive).....	27

Abkürzungsverzeichnis

ASTM	ASTM International, ehemals "Amerikanische Gesellschaft für Tests und Materialien"
CAEP	Ausschuss für den Umweltschutz in der Luftfahrt innerhalb der ICAO
CAGR	Compound Annual Growth Rate (Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate)
CH₄	Methan
CNG	Kohlenstoffneutrales Wachstum
CO₂	Kohlendioxid
DME	Dimethylether (C ₂ H ₆ O)
EASA	Europäische Agentur für Flugsicherheit
ECA	Emissionskontrollbereiche
EEA	Europäischer Wirtschaftsraum
THG	Treibhausgas
GJ	Gigajoule
H₂	Wasserstoff
IATA	Internationaler Luftverkehrsverband
ICAO	Internationale Zivilluftfahrt-Organisation
IEA	Internationale Energieagentur
IMO	Internationale Seeschiffahrtsorganisation
LHV	Unterer Heizwert
LNG	Flüssigerdgas
MENA	Naher Osten und Nordafrika
MJ	Megajoule
Mt	Megatonne (10 ⁶ Tonnen)
Mtoe	Millionen Tonnen Öläquivalent
MW	Megawatt
PtL	Power-to-Liquid (aus Strom hergestellter flüssiger Kraftstoff)
PtX	Power-to-Liquid oder Power-to-Gas (aus Strom hergestellte flüssige und gasförmige Kraftstoffe)
RPK	Einnahmen Passagierkilometer
RTK	Einnahmen Tonnenkilometer
SAF	Nachhaltige alternative Kraftstoffe
UNFCCC	Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen

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 bereit-

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.

gestellt werden können und wie sichergestellt werden kann, dass in beiden Sektoren nur solche Kraftstoffe verwendet werden.

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. Fahren 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 Hochseeschiffahrt 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 Dos-

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.

siers 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.

1.3 Struktur

Dieses Strategiepapier fasst eine umfassende Analyse der Optionen zusammen, um langfristig Klimaneutralität im Luft- und Seeverkehr zu erreichen.⁷ Der Schwerpunkt dieses Papiers liegt auf Strategien zur Klimaneutralität im Luftverkehr. Ein ähnliches Strategiepapier behandelt Strategien für den Seeverkehr.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 Menge an erneuerbarer Energie abzuschätzen, welche für die Defossilisierung des Luftverkehrs erforderlich sind. 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 potenzielle Fahrpläne für den Übergang zur Klima- oder zumindest Kohlenstoffneutralität. Schließlich ziehen wir in Kapitel 6 allgemeine Schlussfolgerungen und geben konkrete politische Empfehlungen.

2 Energiebedarf

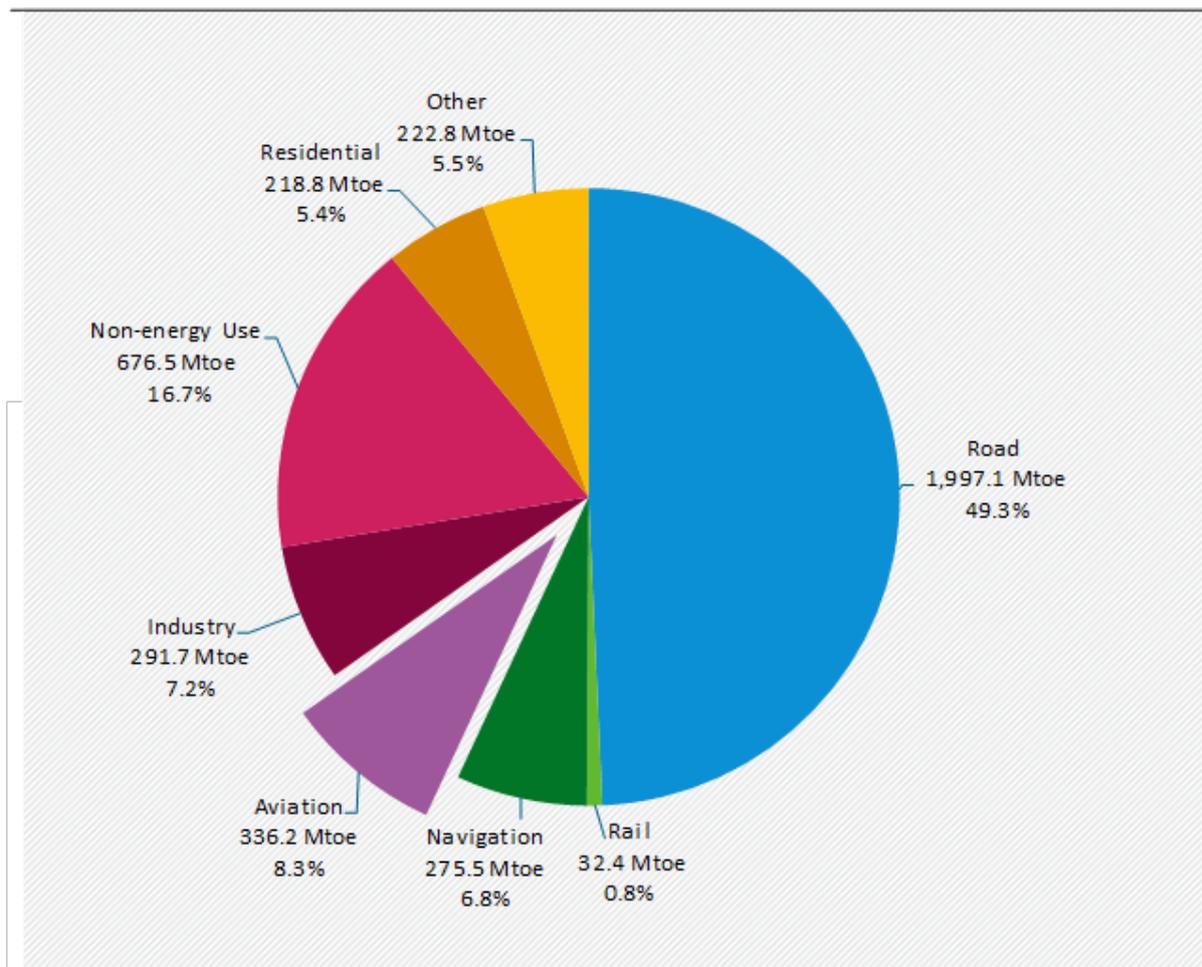
Derzeit werden fast 100% des Luft- und Seeverkehrs mit fossilen Brennstoffen betrieben (IEA 2020c). Die CO₂-Emissionen aus der Ölverbrennung machen den größten Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen aus und sind daher in der Regel die einzigen Treibhausgase, die in den bestehenden Projektionen berücksichtigt werden. Die Nicht-THG-Auswirkungen des Luftverkehrs werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Obwohl sie bedeutend sind, werden ihre Auswirkungen immer noch diskutiert (Lee et al. 2021) mit dem Ergebnis, dass die Projektionen mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

Prognosen des Luftverkehrsangebots und der Luftverkehrsnachfrage werden von verschiedenen Akteuren und zu verschiedenen Zwecken erstellt. Mehrere kurz- und mittelfristige Prognosen dienen der Optimierung des Flugverkehrsmanagements und der Planung der Infrastrukturkapazität, häufig auf lokaler oder regionaler Ebene. Langfristige globale Prognosen werden beispielsweise von der Luftfahrtindustrie erstellt, um einen Hinweis auf die künftige Flugzeugnachfrage zu geben. Schlüsselindikatoren, die typischerweise in Luftverkehrsprognosen zu finden sind, sind Passagiere, Passagierkilometer oder die Anzahl der künftig benötigten Flugzeuge.

⁷ Umweltbundesamt 2021: Klimaschutz im Luft- und Seeverkehr.

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

Abbildung 1: Anteil der Luftfahrt am weltweiten Ölverbrauch (2018)



Quelle: IEA (2020a)

Prognosen, die darauf abzielen, die Energienachfrage im Luftverkehr vorauszusagen, werden nur selten erstellt. Mehrere Studien, die sich mit der Vorhersage des weltweiten Energiebedarfs befassen, z. B. von der Energiewirtschaft (BP Energy Outlook, Shell usw.), weisen den Luftverkehr nicht als eigenen Sektor aus. Aufgrund seines relativ geringen Anteils spielt der Luftverkehr in globalen Energiestudien nur eine untergeordnete Rolle. Nach Angaben der IEA hatte der Luftverkehr 2018 einen Anteil von 8,3% an der weltweiten Rohölnachfrage (mit steigender Tendenz gegenüber einem Anteil von 6,4% an der weltweiten Rohölnachfrage im Jahr 2015). Gemessen am Endenergieverbrauch hatte der Luftverkehr im Jahr 2018 einen Anteil von 3,9% an der weltweiten Energienachfrage.

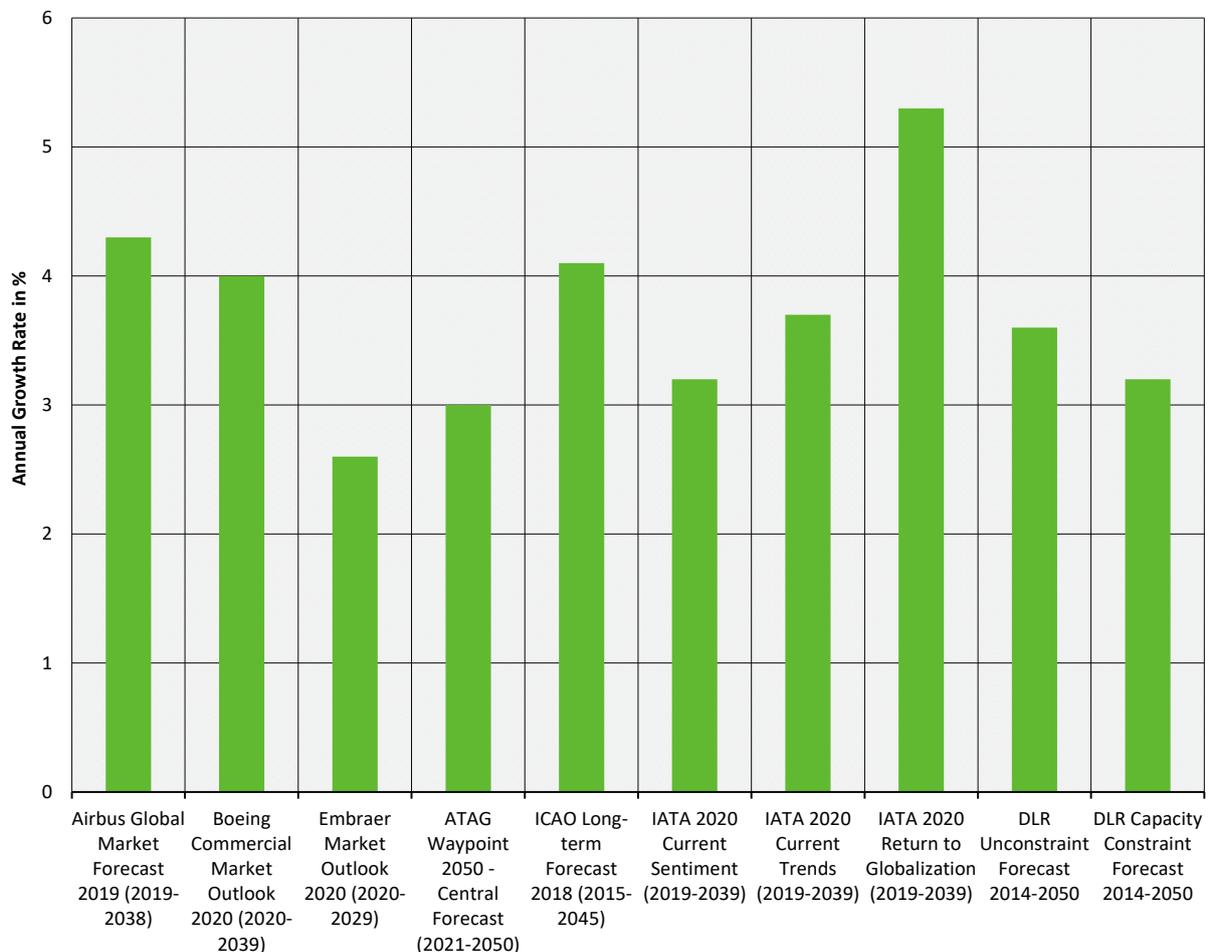
2.1 Prognosen zum Verkehrswachstum

Nach den analysierten Prognosen (Airbus 2019; Boeing 2020; Embraer 2018; ATAG 2020; EASA 2019; EUROCONTROL 2018; ICAO 2020; 2018; ICAO 2016; IATA 2020; IEA 2018; Shell 2018; Gelhausen et al. 2019; DIW Econ et al. 2015; UBA 2018; BP 2019) wird erwartet, dass der Luftverkehr mit Raten zwischen 2,6 und 5,3%, gemessen in verkauften Passagierkilometern pro Jahr, weiter wachsen wird. Die wichtigsten Faktoren, die zu diesem Trend beitragen, sind eine stärkere Integration der Länder in globalisierte Wirtschafts- und Logistikketten und ein Anstieg des verfügbaren Einkommens. In der Vergangenheit hat sich das Einkommen als Haupttriebkraft

für die Luftverkehrsnachfrage erwiesen, da die Neigung zu Flugreisen steigt und zeitaufwändigere Bodentransportmittel durch Flugreisen ersetzt werden.

Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Wachstumsraten des weltweiten Passagierverkehrs. Da sich die Abbildung auf das Wachstum des Passagierverkehrs konzentriert, sind nicht alle oben genannten Prognosen und Szenariostudien enthalten. So enthalten beispielsweise sowohl die Shell- als auch die BP-Studie keine Daten zum Passagierwachstum.

Abbildung 2: Jährliche Wachstumsraten bei den Passagierkilometern in ausgewählten Prognosen



Quelle: Eigene Zusammenstellung des Autors

Neuere Prognosen (Boeing 2020; ATAG 2020; ICAO 2020; IATA 2020) befassen sich auch mit den langfristigen Auswirkungen der COVID-19-Pandemie. Im Durchschnitt sind die langfristigen Wachstumsraten geringer als in den Prognosen vor COVID. Die Akteure des Luftverkehrs erwarten, dass das 2019 beobachtete globale Nachfrageniveau innerhalb von ca. 3-5 Jahren wieder erreicht wird. Die ersten langfristigen Prognosen, die nach Beginn der COVID-19-Pandemie veröffentlicht wurden, zeigen zwar geringere Verkehrswachstumsraten als vor der COVID-Pandemie, aber es wird immer noch erwartet, dass sich der Luftverkehr erholen wird, insbesondere im Jahrzehnt nach 2030.

2.2 Effizienz-Projektionen

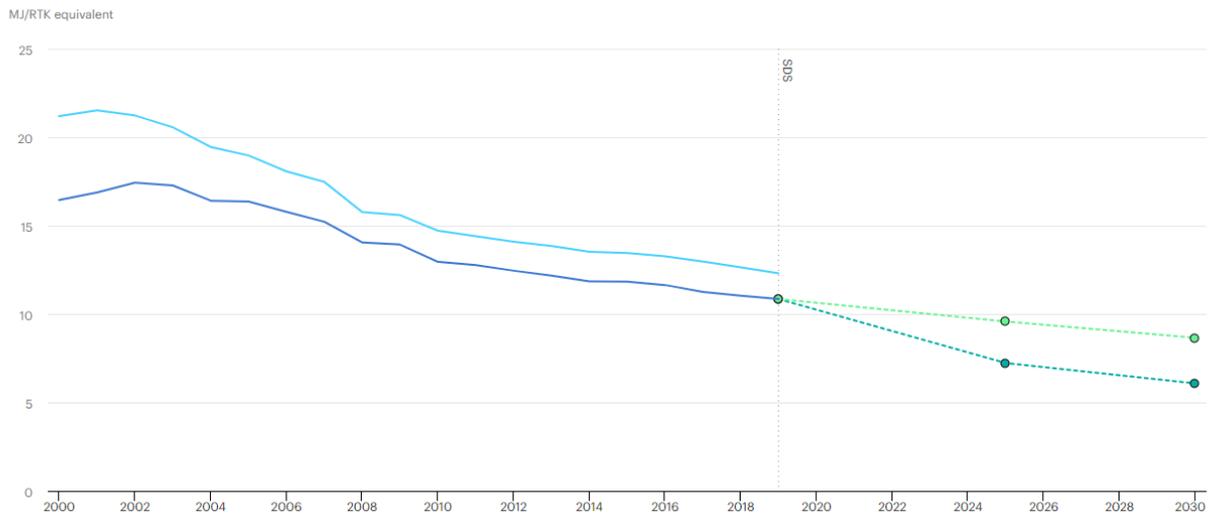
Die Studien sind sich einig, dass technologische und betriebliche Maßnahmen den Energiebedarf weiter vom Wachstum des Luftverkehrs abkoppeln werden. Dennoch steigt die Energienachfra-

ge im Luftverkehr im Vergleich zu anderen Sektoren relativ stark an. Die mit dem Anstieg der Energienachfrage im Luftverkehr verbundenen Herausforderungen sind:

- ▶ Im Vergleich zu anderen Sektoren ist es in der Luftfahrt relativ schwierig, flüssige Kohlenwasserstoffe durch andere Energieträger (wie die direkte Nutzung von Wasserstoff oder Strom) zu ersetzen. Derzeit wird an der Einführung von hybrid-elektrischen, vollständig batterie-elektrischen oder wasserstoffbetriebenen Flugzeugen geforscht. Aber innerhalb der nächsten 20 Jahre wird der Markteintritt nur für Regional-/Kurzstreckenflugzeuge erreicht, die lediglich einen Anteil von wenigen Prozentpunkten an den weltweiten CO₂-Emissionen des Luftverkehrs haben. Daher kann das Emissionsminderungspotenzial in diesem Bereich als eher gering angesehen werden. Für die meisten Verkehrssegmente im Luftverkehr bleibt Rohöl eine wichtige Grundlage für die Energieversorgung, bis synthetische Kraftstoffe in großem Umfang und zu erschwinglichen Preisen zur Verfügung stehen werden. Da andere Sektoren ihre Abhängigkeit vom Erdöl leichter verringern können, wird der Anteil der Erdölnachfrage im Luftverkehr voraussichtlich von derzeit 6 auf 9% im Jahr 2040 steigen (IEA 2016).
- ▶ Verbesserungen der Energieeffizienz in der Luftfahrt werden nur langsam auf die gesamte weltweite Flotte übertragen, da Flugzeuge Vermögenswerte mit einer vergleichsweise langen technischen und wirtschaftlichen Lebensdauer sind. Dies gilt sowohl für einzelne Flugzeuge, die eine durchschnittliche Lebensdauer von mehr als 25 Jahren haben, als auch für Flugzeugtypen, die - einmal auf dem Markt eingeführt - über lange Zeiträume in Produktion bleiben. Die Hauptgründe dafür, dass in Betrieb befindliche Flugzeugtypen nicht mit moderneren Technologien aufgerüstet werden, sind die Komplexität und die Kosten für eine Neuzertifizierung sowie der Wunsch der Fluggesellschaften, die Flottenvielfalt so gering wie möglich zu halten, um die Kosten für die Ersatzteilhaltung und die Ausbildung der Ingenieure zu senken.

In der Vergangenheit wurden verschiedene Studien zur Verbesserung der flottenweiten Effizienz durchgeführt. So hat beispielsweise die IEA (2020) die Verbesserung der Energieeffizienz im Luftverkehr auf der Grundlage von MJ/RTK analysiert. Seit 2000 hat sich der spezifische Energieverbrauch von 21,2 MJ/RTK auf 12,3 MJ/RTK im Jahr 2019 verbessert, was einer jährlichen Verbesserung von 2,8% pro Jahr entspricht. Unter der Annahme des von der ICAO angestrebten Ziels von 2% würde der Energieverbrauch im Jahr 2030 auf 8,7 MJ/RTK sinken.

Abbildung 3: Energieeffizienz in der weltweiten Passagierluftfahrt



Quelle: IEA (2020b)

Andere Quellen kommen zu dem Schluss, dass die Effizienzsteigerungen in der Vergangenheit deutlich geringer ausfielen als die Werte der IEA (2020b). ICCT (2020) zum Beispiel analysiert die langfristige Verbesserung der Treibstoffeffizienz auf der Grundlage der Inbetriebnahme neuer Verkehrsflugzeuge und kommt zu jährlichen Effizienzsteigerungen von 0,6% zwischen 2000 und 2010 und von 1,5% im Jahrzehnt nach 2010. Letzteres ist höchstwahrscheinlich auf die Einführung des Airbus A320neo, A350 und Boeing 737/787 zurückzuführen.

In der Vergangenheit waren die flottenweiten Effizienzverbesserungen relativ hoch und betragen in den zehn Jahren zwischen 1990 und 2000 mehr als 2% pro Jahr. Dieser Wert ist zwischen 2000 und 2010 auf 1,3 bis 1,9% zurückgegangen, und für das Jahrzehnt zwischen 2010 und 2020 wird ein weiterer Rückgang auf 0,8 bis 0,9% prognostiziert. Aufgrund der Indienststellung modernerer Flugzeuge in den kommenden Jahren wird für das Jahrzehnt von 2020 bis 2030 ein Anstieg auf ca. 1,4% erwartet. Die ICAO hat ein ehrgeiziges Ziel festgelegt, das einen Beitrag zur Strategie für kohlenstoffneutrales Wachstum leisten soll. Das angestrebte Ziel für das laufende Jahrzehnt liegt bei 2% p.a. und damit deutlich über den Erfahrungswerten der letzten 10-20 Jahre.

2.3 Prognosen zur Energienachfrage

Die meisten öffentlich zugänglichen Prognosestudien liefern Daten zur Verkehrsaktivität (Passagiere, Frachttonnen, RPKs, RTKs), nicht aber zur tatsächlichen Entwicklung des Energiebedarfs. Die künftige Energienachfrage hängt von der Verkehrsentwicklung und der Effizienz des Luftverkehrssystems (Flugzeugtechnologie, Betrieb und Luftverkehrsmanagement) ab. Die sich daraus ergebenden Wachstumsraten für die Entwicklung des Verkehrs und des Energiebedarfs sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Wachstum der weltweiten Luftverkehrsnachfrage und Schätzung des Wachstums der Energienachfrage

Vorhersage	Jahr der Veröffentlichung	Zeitraumen	Wachstum der Luftverkehrsnachfrage p.a. (CAGR)	Schätzung des Wachstums der Energienachfrage pro Jahr (CAGR)
Langfristige ICAO-Prognose	2018	2015-2045	4.1%	2.1% - 3.3%
Airbus Weltmarktprognose	2019	2019-2038	4.3%	2.3% - 3.5%
Boeing Commercial Marktausblick	2020	2020-2039	4.0%	2.0% - 3.2%

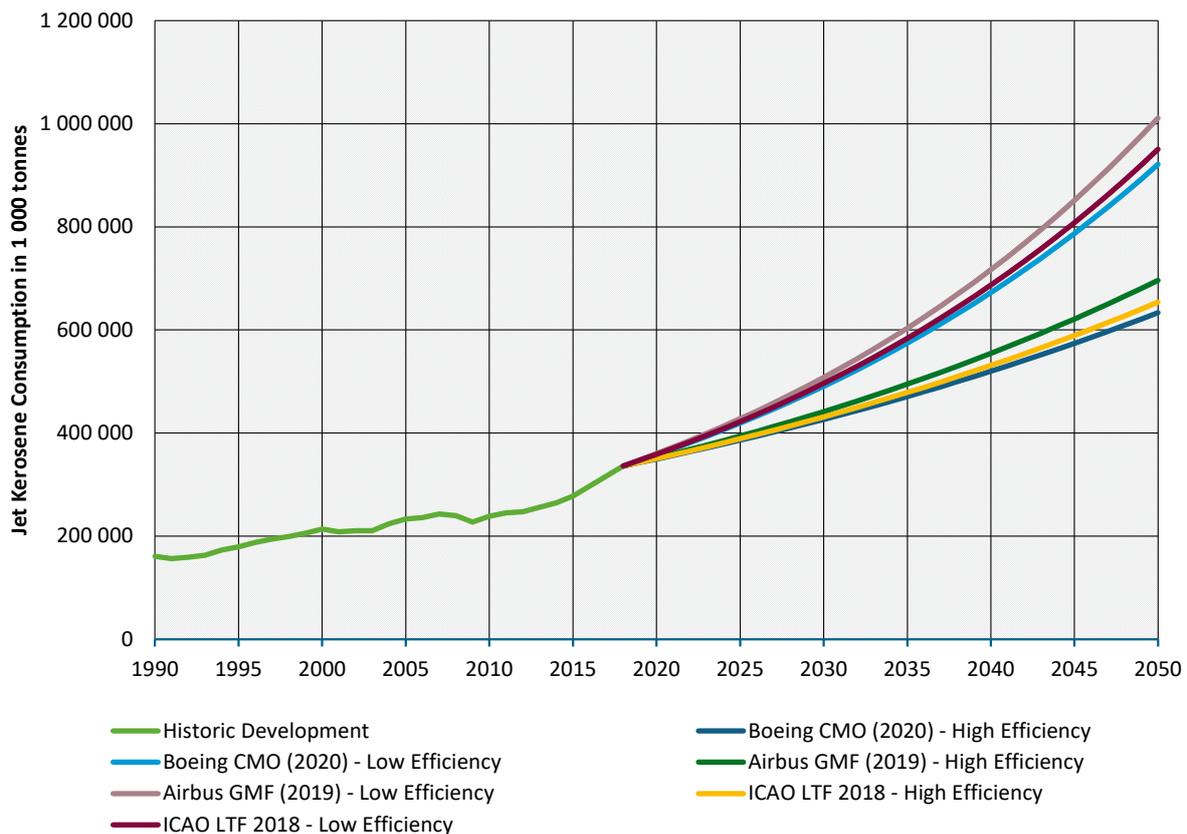
Quelle: Eigene Zusammenstellung

Ausgehend von der weltweiten historischen Entwicklung der Energienachfrage und des Verkehrsaufkommens sowie den oben genannten Prognosen und Annahmen über künftige Verbesserungen der Energieeffizienz, zeigt Abbildung 4 die Entwicklung der weltweiten Nachfrage nach Kerosin. Im Jahr 2018 wurden nach IEA (2018) 336 Mtoe Kerosin verbraucht. In dieser Zahl ist aber Kerosin enthalten, das für vielfältige Zwecke verbraucht wird, z. B. für den Passagier- und Frachtverkehr sowie für den militärischen Verbrauch. Ein kleiner Teil des Flugturbinenkraftstoffs wird auch für andere Zwecke als den Luftverkehr verwendet, da Flugturbinenkraftstoff als Ersatz für andere Mitteldestillate wie Diesel oder Petroleum verwendet werden kann.⁹

Auf der Grundlage der Prognosen und Annahmen über die Verbesserung der Treibstoffeffizienz reicht die Nachfrage nach Flugkraftstoff im Jahr 2050 von 484 Mio. t (ICAO CAEP/11 Low Scenario in Kombination mit einer hohen Effizienzverbesserung) bis 1 096 Mio. t (ICAO CAEP/11 High Scenario mit einer niedrigen Effizienzverbesserung; nicht in Abbildung 4 dargestellt). Im ICAO CAEP/11 Most Likely Scenario liegt der Bedarf an Flugkraftstoff im Jahr 2050 zwischen 637 Mio. t und 958 Mio. t, d. h. zwei- bis dreimal so hoch wie 2015.

⁹ Während in der deutschen Sprache der Begriff "Kerosin" synonym mit Kerosin verwendet wird, wird im amerikanischen Englisch "Kerosene" für das deutsche "Petroleum" verwendet.

Abbildung 4: Projektion für den weltweiten Energiebedarf in der Luftfahrt



Quelle: Eigene Zusammenstellung des Autors

Angesichts der Analyse der jüngsten empirischen Trends von 2000 bis 2019 kann das Ziel einer Verbesserung von 2% pro Jahr bis 2020 und eines kohlenstoffneutralen Wachstums ab 2021 kaum allein durch den regulären Flottenwechsel erreicht werden. Auch das EU-Emissionshandelssystem und CORSIA haben derzeit nur begrenzte Auswirkungen, da sie die Defossilisierung des Luftverkehrs nicht direkt angehen sowie die Emissionen des Luftverkehrs nur durch Emissionssenkungen in anderen Sektoren ausgeglichen werden. Die Verfügbarkeit von Gutschriften und Zertifikaten für die Erfüllung von Verpflichtungen könnte sich langfristig als äußerst schwierig erweisen, wenn andere Sektoren bereits dekarbonisiert sind und möglicherweise keine überschüssigen Kohlenstoffgutschriften mehr liefern.

Je nach Wachstum der Luftverkehrsnachfrage und spezifischen Verbesserungen ist damit zu rechnen, dass Energieverbrauch und CO₂-Emissionen bis 2050 um das Zwei- bis Dreifache ansteigen werden, sofern keine radikal neuen Konzepte für Antrieb oder Energieversorgung umgesetzt werden. Technologische Verbesserungen in den Bereichen Flugzeuge, Triebwerke, Betriebsverfahren und Flugverkehrsmanagement allein werden die wachsende Luftverkehrsnachfrage nicht ausgleichen können, die vor allem aus den Schwellenländern kommt, in denen das Einkommen wächst. Technisch gesehen haben E-Fuels das Potenzial, die Herausforderungen für die Luftfahrt sowohl bei der Energieversorgung als auch bei den Verpflichtungen zur Kohlenstoffreduzierung zu bewältigen.

3 Handlungsfelder

Verglichen mit beispielsweise dem Schienen- oder Straßenverkehr ist der Luftverkehr schwieriger zu dekarbonisieren (z. B. ICCT 2019). Laut einer Reihe von Studien (z.B. Schmidt et al. 2016; ICCT 2019) kann der zunehmende Einsatz von E-Fuels jedoch als vielversprechende langfristige Strategie zur deutlichen Reduzierung der CO₂-Emissionen im Luftverkehr angesehen werden. Voraussetzung dafür ist die Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Quellen.

3.1 Barrieren

Aufgrund der langen Lebenszyklen bestehender Infrastrukturen, Flugzeugtypen und (Triebwerks-)Technologien in Verbindung mit einem (noch) sehr begrenzten Anwendungsbereich für neue Technologien (wie die direkte Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen für den Elektroantrieb) und der Notwendigkeit weltweit einheitlicher technischer und betrieblicher Normen und Verfahren, wäre es zu kostspielig in absehbarer Zukunft einen signifikanten Übergang zu postfossilen Energieversorgungsformen wie Wasserstoff zu erreichen. Angesichts der Zeitspanne von mindestens 20 Jahren für die Einführung völlig neuer, auf Wasserstoff basierender Flugzeugkonstruktionen in den kommerziellen Betrieb und des begrenzten verbleibenden Budgets für Kohlenstoffemissionen, das dem Luftfahrtsektor zur Verfügung steht, würde die Konzentration auf einen Wasserstoffpfad statt auf einen Drop-in-Kraftstoffpfad höchstwahrscheinlich zu einer erheblichen "Verschwendung" dieses Kohlenstoffbudgets führen. Mit anderen Worten: Auch wenn postfossile E-Fuels heute noch recht teuer sind, ist es wahrscheinlicher, dass sie den Beitrag des Luftverkehrs zu den globalen Bemühungen um eine Verringerung der CO₂-Emissionen viel früher leisten werden als Kraftstoffe, die aus einem Wasserstoffpfad hervorgehen.

Darüber hinaus ist es schwierig, einen Energieträger zu finden, der ähnliche Eigenschaften wie Flugzeugtreibstoff in Bezug auf Energiegehalt, Verwendbarkeit und technische Machbarkeit aufweist. In dieser Hinsicht unterscheidet sich der Luftverkehr vom Landverkehr, wo die direkte Nutzung von Elektrizität als Energieträger bereits beim heutigen Stand der Technik als bewährtes Konzept angesehen werden kann. Schließlich müssen diese technologischen Herausforderungen vor dem Hintergrund eines hohen langfristigen Nachfragewachstums bewältigt werden, welches auch für eine Welt nach COVID-19 angenommen werden kann.

Die Notwendigkeit einer marktorientierten Maßnahme, die auf ICAO-Ebene anerkannt wurde und dort zur Entstehung von CORSIA geführt hat, unterstreicht, dass andere Maßnahmen (wie neue Technologien und betriebliche Verbesserungen) nicht ausreichen, um die jährlichen Kohlenstoffemissionen auf einem konstanten Niveau zu halten (CNG-Ziel für 2020) - geschweige denn, um wirklich einen Nettoabbau der Emissionen zu erreichen. Die europäische Luftfahrtindustrie sieht die Notwendigkeit nachhaltiger alternativer Kraftstoffe (SAF) als Schlüssel zur Verringerung der Klimaauswirkungen des Luftverkehrs an, da Fortschritte in der Flugzeugtechnologie allein nicht ausreichen werden, um die Defossilisierung des Sektors zu erreichen.

Ähnlich wie Biokraftstoffe haben E-Fuels den Vorteil, dass bestehende Infrastrukturen, Fahrzeuge und Motoren weiter genutzt werden können - zumindest bis zu einem gewissen Drop-in-Niveau (z.B. Schmidt et al. 2016). Außerdem kann der Übergang zu E-Kraftstoffen schrittweise erfolgen, da eine Beimischung zu herkömmlichem Düsenkraftstoff möglich ist. Da in Zukunft mehr E-Kraftstoffe zur Verfügung stehen werden, könnte der Anteil synthetischer Kraftstoffe in den Kraftstoffmischungen im Laufe der Zeit steigen.

Auf der Grundlage von Daten, Literaturanalysen und Befragungen von Interessenvertretern haben wir die wichtigsten Hindernisse für den Einsatz synthetischer E-Kraftstoffe im Luftverkehrssektor zusammengestellt, die in Abbildung 5 dargestellt sind: hohe Kosten und das Fehlen eines politischen Fahrplans oder einer Strategie, die mit etablierten Technologien und den damit verbundenen Pfadabhängigkeiten kollidieren.

Abbildung 5: Haupthindernisse für die Einführung von E-Kraftstoffen im Luftverkehr



Quelle: Eigene Zusammenstellung des Autors

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 vorteil-

haft 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 Herausforderungen 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.

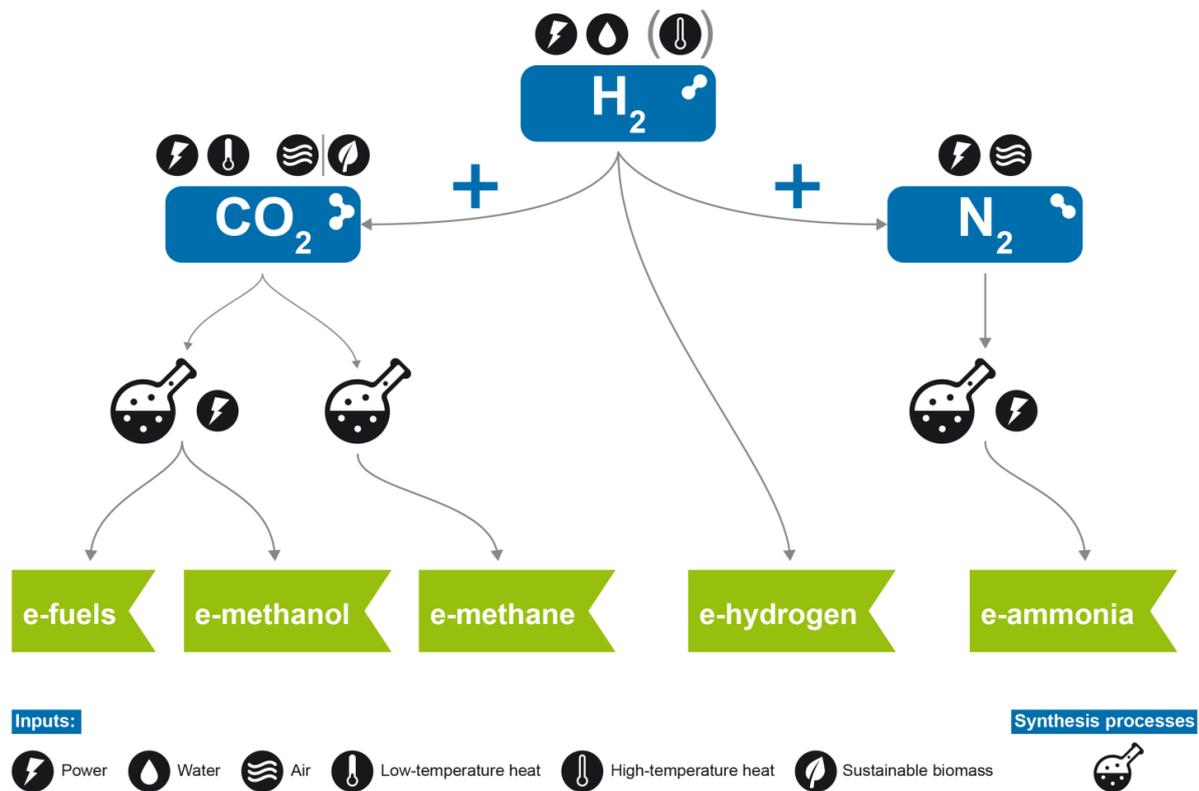
4.1 Technischer und marktbezogener Status quo

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 6). 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 6: Produktionsschritte für verschiedene E-Kraftstoffe



Anmerkungen: Der Begriff E-Kraftstoffe steht in dieser Abbildung für alle flüssigen Kohlenwasserstoff-E-Kraftstoffe.
 Quelle: Eigene Zusammenstellung des Autors

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 CO_2 aus der Umgebungsluft stammen.¹⁰ Dementsprechend wird nur CO_2 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 CO_2 aus Abgasströmen biogener Industrieprozesse ist eine verfügbare Standardtechnologie, die einen eher geringen Energieeinsatz erfordert (ifeu 2019). Trotz erheblicher technologischer Fortschritte ist die CO_2 -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

¹⁰ CO_2 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 CO_2 -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 2: 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

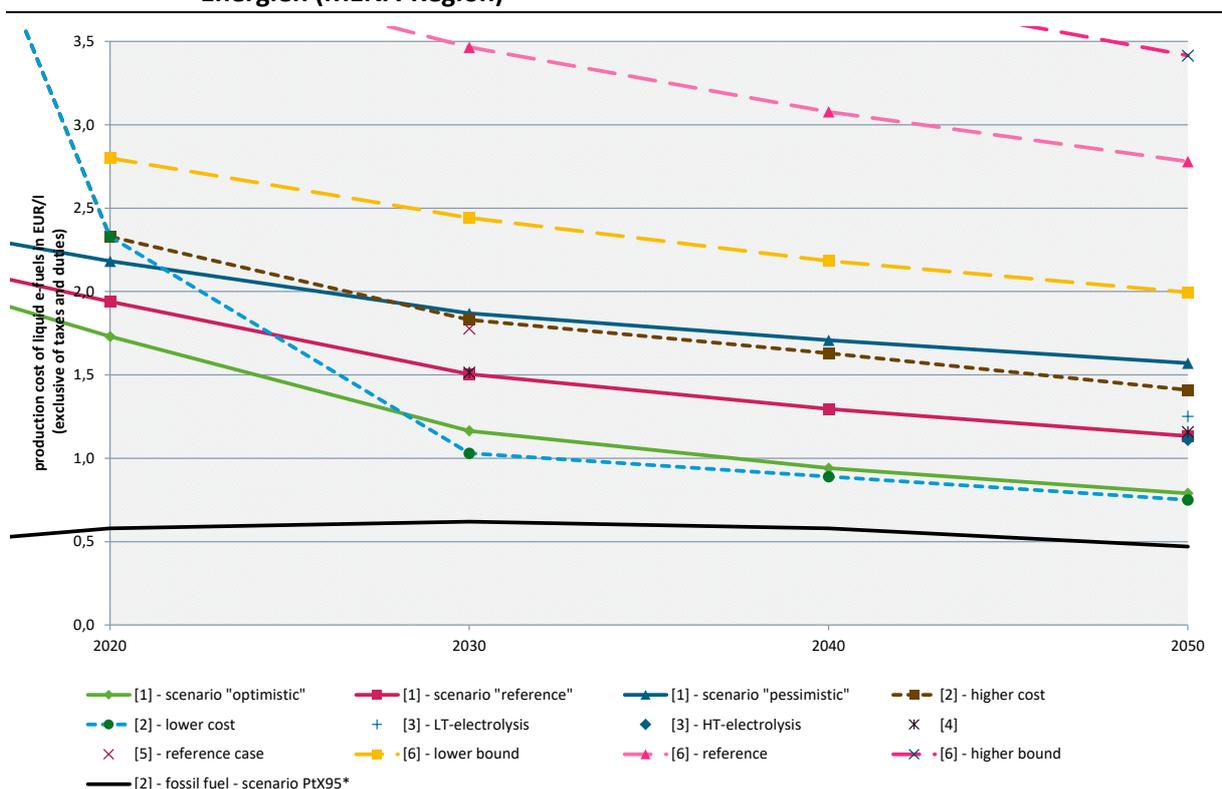
Quelle: Eigene Einschätzung

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 7 gibt einen Überblick über verschiedene Kostenszenarien 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 7 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 7: 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 Produk-

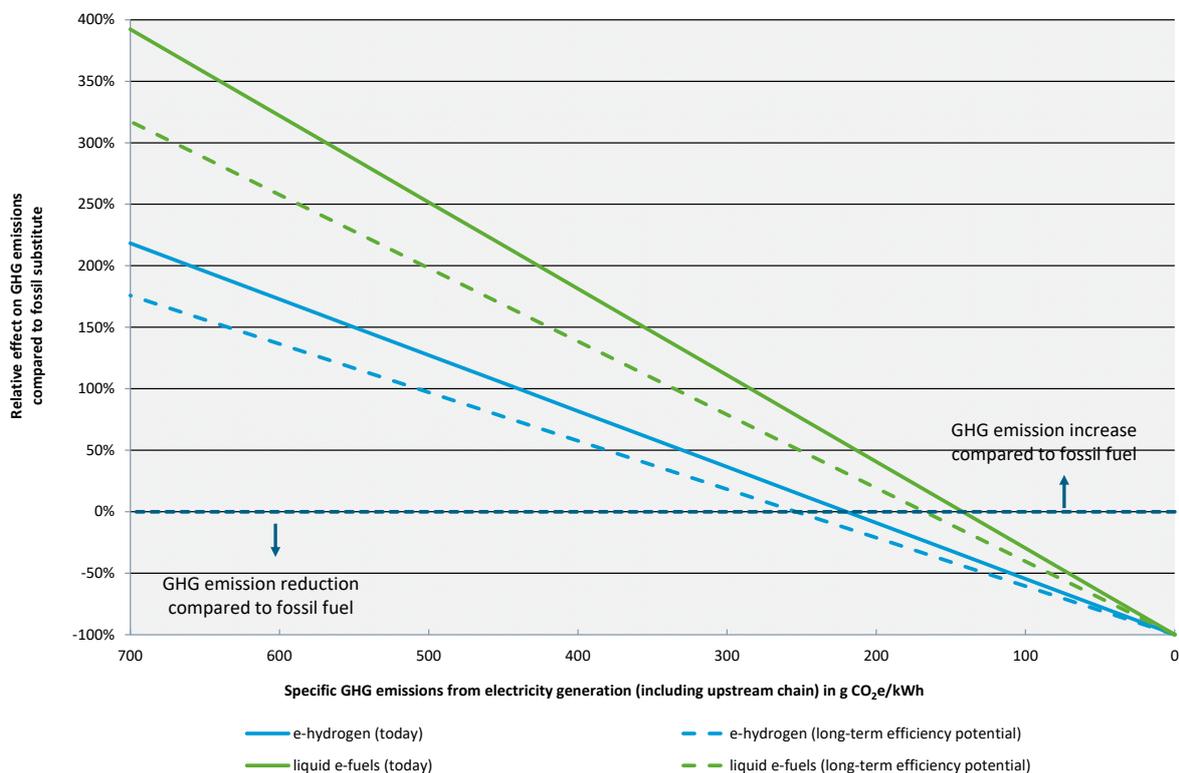
tionsstandorte und Regionen die Produktion dominieren. Die mögliche Folge könnte eine große Marktmacht dieser Akteure sein, die bei möglichen Einführungsstrategien für die E-Kraftstoff-Produktion berücksichtigt werden müssten.

4.3 Treibhausgasreduzierungs-Potenzial

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 8). 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 Stromerzeugung 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 8: 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.¹¹ 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.

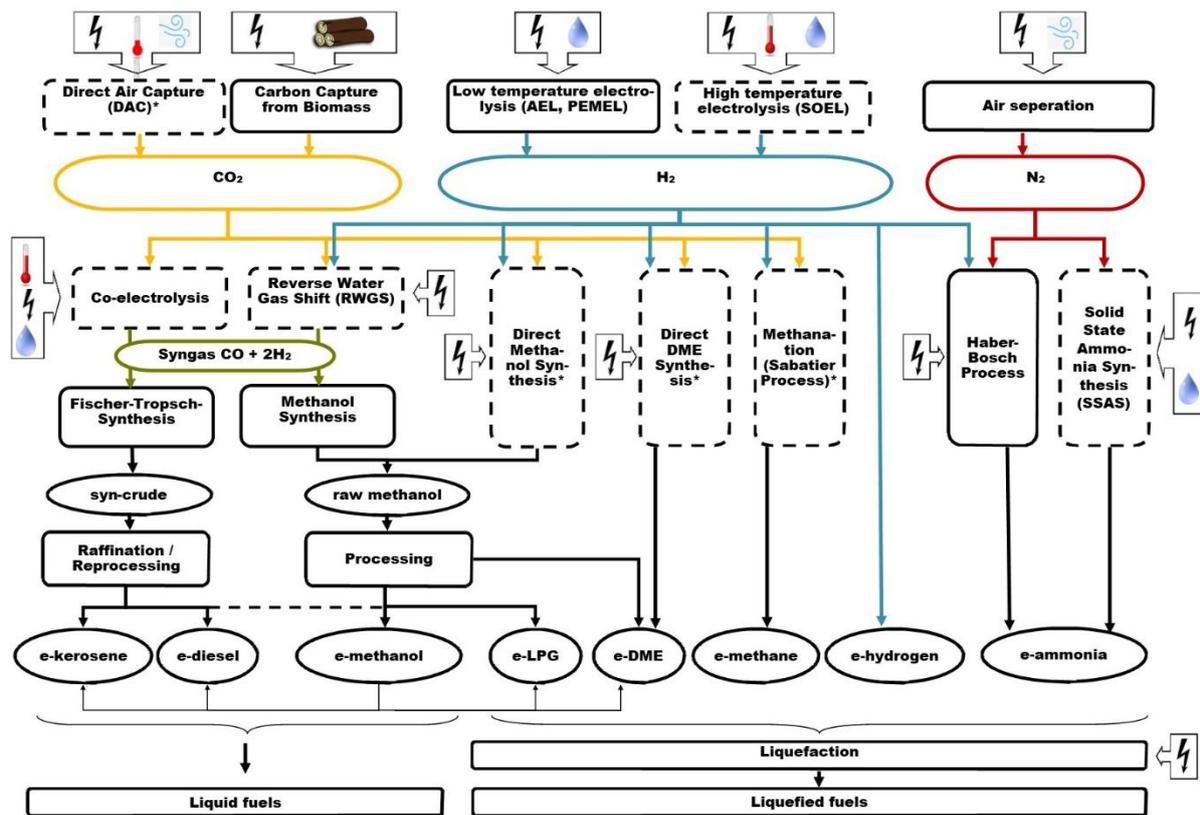
Um sicherzustellen, dass E-Kraftstoffe nachhaltig sind und zur Verringerung der Treibhausgasemissionen beitragen, muss die Produktion von E-Kraftstoffen strengen Kriterien genügen. Die Definition solcher Nachhaltigkeitskriterien ist von herausragender Bedeutung für die Klimaschutzwirkung von E-Fuels 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.

¹¹ Die durchschnittlichen THG-Emissionen von Strom in Deutschland im Jahr 2018 werden auf bis zu 641 g CO₂e/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.

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 9 zeigt einen Überblick über 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 9: 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 des Autors

In Tabelle 3 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 3: 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 Me-

thanschlupfs 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 4: Bewertung der Wirkungskategorien für verschiedene E-Kraftstoffe (langfristige Perspektive)

	Landnutzung	Produktionskosten	Treibhausgas-minderungspotenzial
Ammoniak	o	o	++
DME	-	-	++
Wasserstoff	+	+	++
Methan	-	-	+ (Gefahr von Methanschlupf)
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 Null-Emissionen

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 politische Maßnahmen und Instrumente auf nationaler, europäischer und/oder 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. Jeder Fahrplan ist somit nur ein Konzept der möglichen Entwicklung, das in vielen Fällen variiert oder durch völlig andere Fahrpläne ergänzt werden könnte.

5.1 Inländisches Vorzeigeprojekt

Die Idee eines Vorzeigeprojekts ist es, ein Schaufenster für den Übergang zu postfossilen Kraftstoffen in der Luftfahrt zu schaffen. Zunächst würde ein einzelner kleiner bis mittelgroßer Flughafen wie der Flughafen Leipzig/Halle mit einem Treibstoffgemisch beliefert werden, das einen zunehmenden Anteil an E-Kerosin enthält. Die Ziele des Vorzeigeprojekts sind:

- ▶ ein Schaufenster für die nachhaltige Produktion von E-Kraftstoffen und das Potenzial zur Verringerung der CO₂-Emissionen im Luftverkehr zu bieten;
- ▶ praktische Erfahrungen mit der Verwendung von Kerosinmischungen mit höheren Anteilen an synthetischen Kraftstoffen zu sammeln;
- ▶ die Nachfrage nach E-Kerosin und damit die E-Kerosin-Produktion zu fördern;
- ▶ der deutschen Industrie zu helfen, eine führende Rolle in einem aufstrebenden Markt zu übernehmen;
- ▶ die Kosten für E-Kraftstoffe durch die Finanzierung der Technologie in der steilen Phase der Lernkurve zu senken; und
- ▶ als Vorzeigebispiel für weitere Maßnahmen dienen.

Ein weiteres Ziel des Vorzeigeprojekts ist es, zu zeigen, dass hohe - und schließlich 100%ige - Beimischungsquoten aus technologischer und sicherheitstechnischer Sicht machbar sind. Aus guten Gründen ist der Luftfahrtsektor in Bezug auf Sicherheitsaspekte risikoscheu. Eine größere strukturelle Veränderung - wie die Umstellung der Hauptkraftstoffquelle - muss vor einer groß angelegten Umsetzung demonstriert und bewertet werden. Darüber hinaus beschleunigt dieses Vorzeigeprojekt die Entwicklung einer neuen Technologie, die sich noch in der steilen Phase der Lernkurve befindet. Die inländische Produktion und Bereitstellung der erforderlichen E-Kraftstoffe wird dazu beitragen, dass Deutschland auf diesem Gebiet eine technologische Führungsposition einnimmt und die internationale Zusammenarbeit in diesem Bereich fördern.

Um die technische Machbarkeit des Umstiegs auf E-Kraftstoffe zu zeigen, muss ein signifikanter E-Kerosin-Anteil durch Beimischung einer begrenzten Menge fossilen Kraftstoffs erreicht werden. Das bedeutet, dass die physische Versorgung der Flugzeuge mit dem Gemisch sichergestellt werden muss. Eine Mischung der gleichen Menge an E-Kraftstoffen mit dem gesamten Kerosinbedarf der gesamten Luftfahrt würde das Ziel, die technische Machbarkeit höherer Mischungsanteile zu zeigen, nicht erreichen. Für das Leuchtturmprojekt schlagen wir vor, mit einem kleinen bis mittelgroßen Flughafen zu beginnen, der nur das Gemisch erhalten würde. Der Flughafen Leipzig/Halle hat einen Kerosinbedarf von ca. 500 000 t/Jahr, was ca. 5% der gesamten Kerosinversorgung der Luftfahrt in Deutschland ausmacht. Zusammen mit der derzeit maximal zulässigen Beimischungsquote von 50% steht dies im Einklang mit der deutschen Wasserstoffstrategie: Die Strategie beinhaltet das erstrebenswerte Ziel, bis 2030 einen Anteil von 2% an

E-Fuels in der Luftfahrt zu erreichen (Bundesregierung 2020). Der Flughafen Leipzig ist auch das Hauptdrehkreuz der Deutschen Post DHL Group. DHL hat sich verpflichtet, bis 2050 kohlenstoffneutral zu werden und ist an der Einführung nachhaltiger E-Kraftstoffe im Luftverkehr interessiert (DHL 2019). Eine Zusammenarbeit mit DHL würde die Sichtbarkeit des Vorzeigeprojekts erhöhen.

Die Einnahmen aus der deutschen Ticketsteuer¹² würden ausreichen, um das Vorzeigeprojekt am Flughafen Leipzig zu finanzieren: Rund 800 Mio. €/Jahr wären erforderlich, um die Kostendifferenz zwischen fossilem und synthetischem Kerosin für einen 50%igen Beimischungsanteil bei den derzeitigen Produktionspreisen in Deutschland von ca. 3 €/l zu subventionieren (AVW; AEW; FE 2018). In der Praxis wäre das Vorzeigeprojekt weniger kostspielig: Es wird erwartet, dass die Produktionskosten im Laufe der Zeit sinken und bereits 2030 in Deutschland unter 2 €/l liegen könnten (Scheelhaase et al. 2019). In diesem Fall würde ein Zuschuss von 0,5 Mrd. € ausreichen, um das Flaggschiff zu finanzieren.

Nach 2030 und sobald die Zulassung von Beimischungsanteilen über 50% erreicht ist, sollte das Vorzeigeprojekt fortgesetzt werden, indem auf 100% E-Kerosin hingearbeitet wird. Ein paralleler Prozess zur Einführung einer verbindlichen Beimischungsquote auf EU-Ebene würde sicherstellen, dass die erforderlichen Produktionsmengen zur Verfügung stehen. Damit soll einmal mehr gezeigt werden, dass eine vollständige Umstellung auf 100% möglich ist.

5.2 Europäische Politik

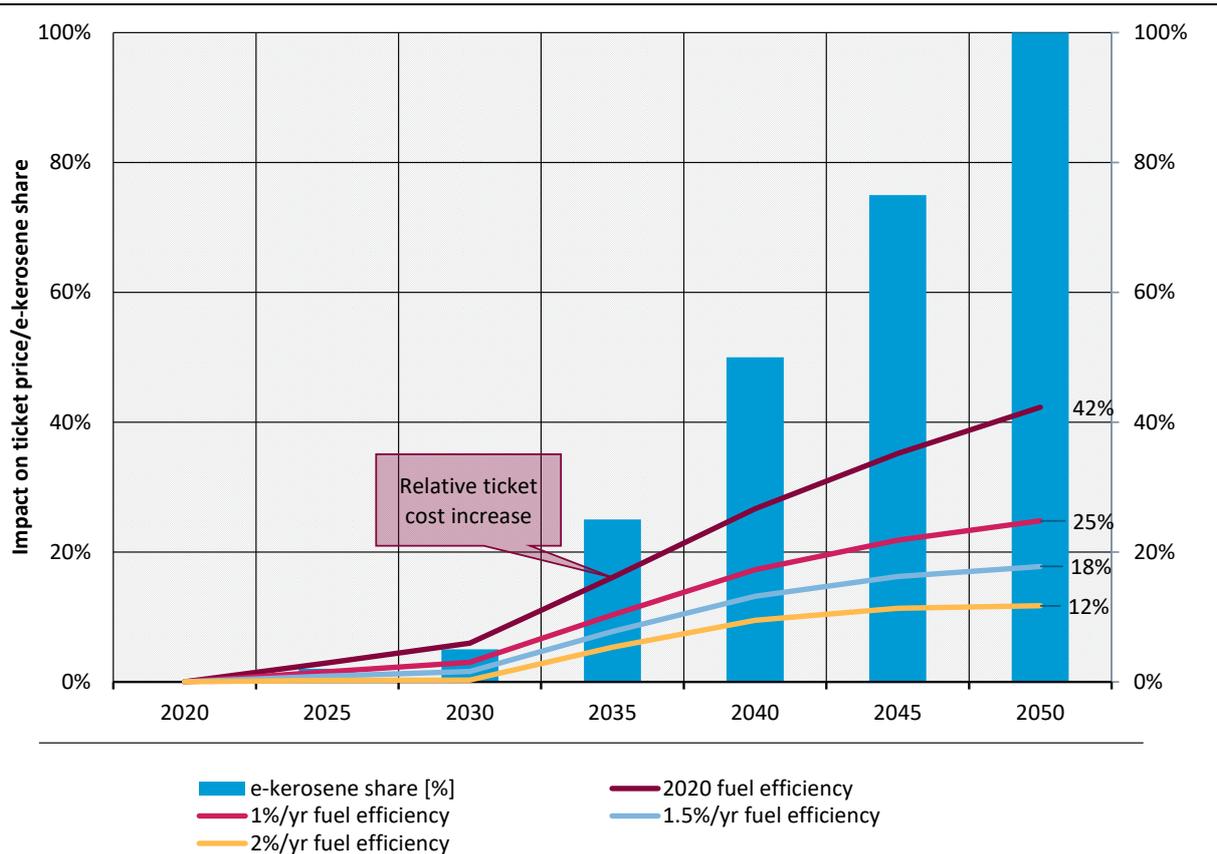
Um den Luftverkehr bis 2050 von fossilen Brennstoffen zu befreien, ist es wichtig, schnell und gleichzeitig umfassend zu handeln. Die Einführung einer verbindlichen, steigenden Beimischungsquote für Flugtreibstoffe ist ein wesentlicher Schritt in diese Richtung. Im Gegensatz zu dem nationalen Vorzeigeprojekt würde die EU weite Beimischungsquote und keine Contracts for Difference-Auktionen als wichtigstes politisches Instrument benötigen. Eine obligatorische Quote mit einem starken Durchsetzungssystem wäre ausreichend und würde keine Subventionen erfordern. Die Kosten würden den Fluggesellschaften beim Tanken direkt in Rechnung gestellt. Die direkte Belastung der Fluggesellschaften beim Tanken stellt sicher, dass die Klimaauswirkungen des Fliegens in den Ticketpreis einfließen und bietet einen noch stärkeren Anreiz für Energieeffizienz als der subventionierte Ansatz des Flaggschiffprojekts. Im Einklang mit dem zunehmenden Anteil von E-Fuels im gesamten Luftverkehr müssen die Subventionen im Flaggschiffprojekt reduziert werden; die Fluggesellschaften sollten nicht weniger zahlen als an anderen Flughäfen.

In der Regel machen die Treibstoffkosten je nach Art der Fluggesellschaft (Full-Service-Carrier oder Low-Cost-Carrier) etwa 20 bis 30% der Ticketkosten aus. Abbildung 10 zeigt die typischen Auswirkungen einer schrittweisen Einführung einer Beimischungsquote von 0 bis 100% zwischen 2020 und 2050 auf die Ticketpreise. Geht man von einem Treibstoffkostenanteil von 25% aus, was ein Durchschnittswert für alle Flugzeugtypen und Entfernungen ist, würde sich eine 100%ige Beimischung von E-Kerosin im Jahr 2050 in einem Anstieg der Ticketpreise um 42% niederschlagen.¹³

¹² Die deutsche Luftverkehrsteuer wurde 2011 eingeführt und belastet Abflüge in Deutschland. Der Steuersatz hängt vom Zielort ab und wird nach 3 Entfernungskategorien unterschieden. Die Steuer bringt mehr als 1 Mrd. EUR/Jahr ein.

¹³ Die Berechnungen gehen von konstanten Kosten für alle Faktoren aus, die nicht mit dem Brennstoff zusammenhängen. Die Preise und Kosten für fossile Brennstoffe für E-Kerosin sind aus Abbildung 7.

Abbildung 10: Auswirkungen einer allmählich steigenden Beimischungsquote auf die Ticketpreise unter verschiedenen Annahmen für Energieeffizienzverbesserungen bis zum Jahr 2050



Anmerkungen: In dieser Abbildung machen die Treibstoffkosten 25% des Fahrpreises aus; alle anderen Fahrpreiskomponenten wurden konstant gehalten. Für die E-Kraftstoffkosten wird ein Preis von 2,10 €/l im Jahr 2020 angenommen, der auf 1,40 €/l im Jahr 2050 sinkt.

Quelle: Eigene Zusammenstellung des Autors

Diese Berechnung basiert auf dem derzeitigen Treibstoffverbrauch, d. h. der derzeitigen Energieeffizienz des Luftfahrtsektors. Unter der Annahme, dass das ICAO-Ziel einer Verbesserung der Treibstoffeffizienz um 2%/Jahr erreicht wird (ICAO 2019)¹⁴ würde der Energiebedarf pro Passagier zwischen 2020 und 2050 um 45% sinken.¹⁵ Der daraus resultierende Ticketpreisanstieg würde nur 12% betragen. Eine jährliche Effizienzverbesserung von 1%, die näher an den historischen Werten liegt, würde bei einem 100%igen E-Kerosin-Anteil bis 2050 zu einem Ticketpreisanstieg von 25% führen. Ein solcher Anstieg der Ticketkosten wäre zwar spürbar, läge aber im Rahmen der Ticketpreisänderungen der letzten Jahrzehnte.¹⁶

¹⁴ Laut ICCT (2020) stieg die Kraftstoffeffizienz pro Tonnenkilometer in den Jahrzehnten seit 1990 im Durchschnitt um 0,8%, 0,6% und 1,5% pro Jahr. Dies führte zu einem Rückgang der CO₂-Emissionen um 1,0%, 0,5% und 1,0% pro Jahr.

¹⁵ Die Steigerung der Energieeffizienz ist aufgrund der hohen Nachfrage nach E-Treibstoffen eine Voraussetzung für einen klimaneutralen Luftverkehr.

¹⁶ Thompson (28. Februar 2013) berichtet zum Beispiel, dass die durchschnittlichen Ticketpreise für Inlandsflüge in den USA zwischen 1980 und 2010 um 50% gesunken sind.

5.3 Internationale Zusammenarbeit

ICAO: Auf internationaler Ebene muss der Prozess zur Erreichung eines kohlenstoffneutralen Luftverkehrs bis 2050 gestärkt werden. Der Prozess zielt darauf ab, eine gemeinsame Vision mit Zielvorgaben, eine Strategie zur Erreichung dieser Vision und schließlich konkrete Meilensteine und Kriterien festzulegen. Idealerweise würde dieser Prozess innerhalb der ICAO stattfinden, um sicherzustellen, dass alle Länder daran teilnehmen. Gleichzeitig sind die Beratungen zum Klimaschutz in der ICAO in der Vergangenheit sehr langsam verlaufen und ließen die nötige Dringlichkeit zur Bewältigung der Klimakrise vermissen.¹⁷

Auf kurze Sicht (bis 2030) wird die Hauptaufgabe der ICAO wahrscheinlich darin bestehen, den Übergang zu nachhaltigem E-Kerosin zu ermöglichen. Dies bedeutet, dass der Prozess zur Festlegung des langfristigen Ziels fortgesetzt werden muss. Ebenso wichtig ist, dass die ICAO die Förderung von E-Kraftstoffen durch ihre Gremien, Foren, Outreach-Maßnahmen und andere Aktivitäten fortsetzt. Es ist wichtig, dass der derzeitige Schwerpunkt der SAF von Biokraftstoffen auf strombasierte Kraftstoffe verlagert wird, um den erwarteten Energiebedarf in den kommenden Jahrzehnten decken zu können, da das Potenzial für nachhaltige Biomasse nicht ausreicht, wenn auch andere Verwendungszwecke berücksichtigt werden. Die ICAO sollte ihre Arbeit auch auf die Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs, insbesondere die Wolkenbildung, konzentrieren. Aufgrund dieser Effekte "erwärmen die Emissionen des Luftverkehrs das Klima derzeit etwa dreimal so stark wie die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs allein" (Lee et al. 2021). E-Kraftstoffe haben das Potenzial, die Nicht-CO₂-Auswirkungen zu verringern, unter anderem weil sie fast keinen Schwefel enthalten und daher bei ihrer Verwendung weniger Ruß erzeugen.

Nachhaltige E-Kerosin-Allianz (SeKA): Internationale Kooperationen können dazu beitragen, den E-Kraftstoffbedarf für das deutsche Vorzeigeprojekt und eine europäische Beimischungsquote zu decken und den Weg für einen globalen Übergang zu ebnen. Ein idealer Standort für die Produktion von E-Kerosin und dessen Export in andere Länder, müsste über hervorragende Bedingungen für zusätzlichen erneuerbaren Strom, eine nachhaltige Wasserversorgung, eine Versorgung mit nicht-fossilem CO₂, stabile politische Verhältnisse und eine bestehende Infrastruktur für den Export der Kraftstoffe verfügen. Der Preis für E-Kraftstoffe hängt in hohem Maße vom Preis für Strom aus erneuerbaren Energiequellen ab. Während in Deutschland zumindest einige Pilotanlagen gebaut werden sollten, um Erfahrungen zu sammeln und die Technologieführerschaft zu demonstrieren, sind andere Länder aufgrund günstigerer Bedingungen für die großtechnische Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien besser für industrielle Großanlagen geeignet.

In Europa könnten Norwegen (Wasserkraft), Schottland (Offshore-Windenergie), Island (Wasserkraft und Geothermie) und Spanien (Solar- und Windenergie) Partner für eine frühe Zusammenarbeit sein. Länder wie Marokko oder Katar in der MENA-Region sind mittelfristig ebenfalls vielversprechende Kandidaten und befinden sich zudem in geografischer Nähe. Marokko hat einen heimischen Bedarf an grünem Wasserstoff für seine Ammoniakproduktionsanlage und hat

¹⁷ Sowohl die ICAO als auch das UNFCCC sind UN-Organisationen, die sich aus denselben Mitgliedern, d. h. nationalen Regierungen, zusammensetzen. Theoretisch sollte dies einen kohärenten Ansatz in gemeinsamen Fragen zwischen diesen beiden Gremien gewährleisten. In der Praxis haben die unterschiedlichen Ziele dieser Organisationen und ihre Zusammensetzung - hauptsächlich Verkehrsministerien für die ICAO und Umweltministerien für das UNFCCC - zu einer deutlichen Ambitionsücke in Bezug auf die Klimaziele geführt.

Interesse an einer Zusammenarbeit im Bereich der E-Treibstoffe bekundet (Solarify.eu 2019). Die SeKA wird interessierte Länder zusammenbringen.¹⁸

Technologische und regulatorische Bereitschaft: Bevor neue synthetische Kraftstoffe für die kommerzielle Luftfahrt verwendet werden können, müssen sie von ASTM International zertifiziert werden. Derzeit sind einige synthetische Kraftstoffe bereits mit Beimischungsgrenzen von 10% oder 50% je nach dem verwendeten Verfahren zertifiziert (Kharina 2018), während andere synthetische E-Kraftstoffe noch nicht ASTM-zertifiziert sind. Mittelfristig ist die Zertifizierung eines oder mehrerer E-Kraftstoffe als alleiniger Energieträger erforderlich, d. h. die Zertifizierung von Beimischungsquoten von bis zu 100%. Es wird mindestens zwei Jahrzehnte dauern, bis die weltweiten E-Kerosin-Produktionskapazitäten so groß sind, dass die Produktion die Hälfte des Energiebedarfs der europäischen Luftfahrt übersteigt, d. h. wenn es notwendig wäre, über 50% Beimischungsquoten hinauszugehen. Es besteht also keine Dringlichkeit, die Zertifizierung bald zu erreichen. Dennoch sollte der Prozess frühzeitig eingeleitet werden, da der Übergang über 50% hinaus auch Änderungen an den Flugzeugen erfordern könnte, z. B. andere Dichtungen mit den richtigen Eigenschaften für die etwas andere Kraftstoffzusammensetzung.

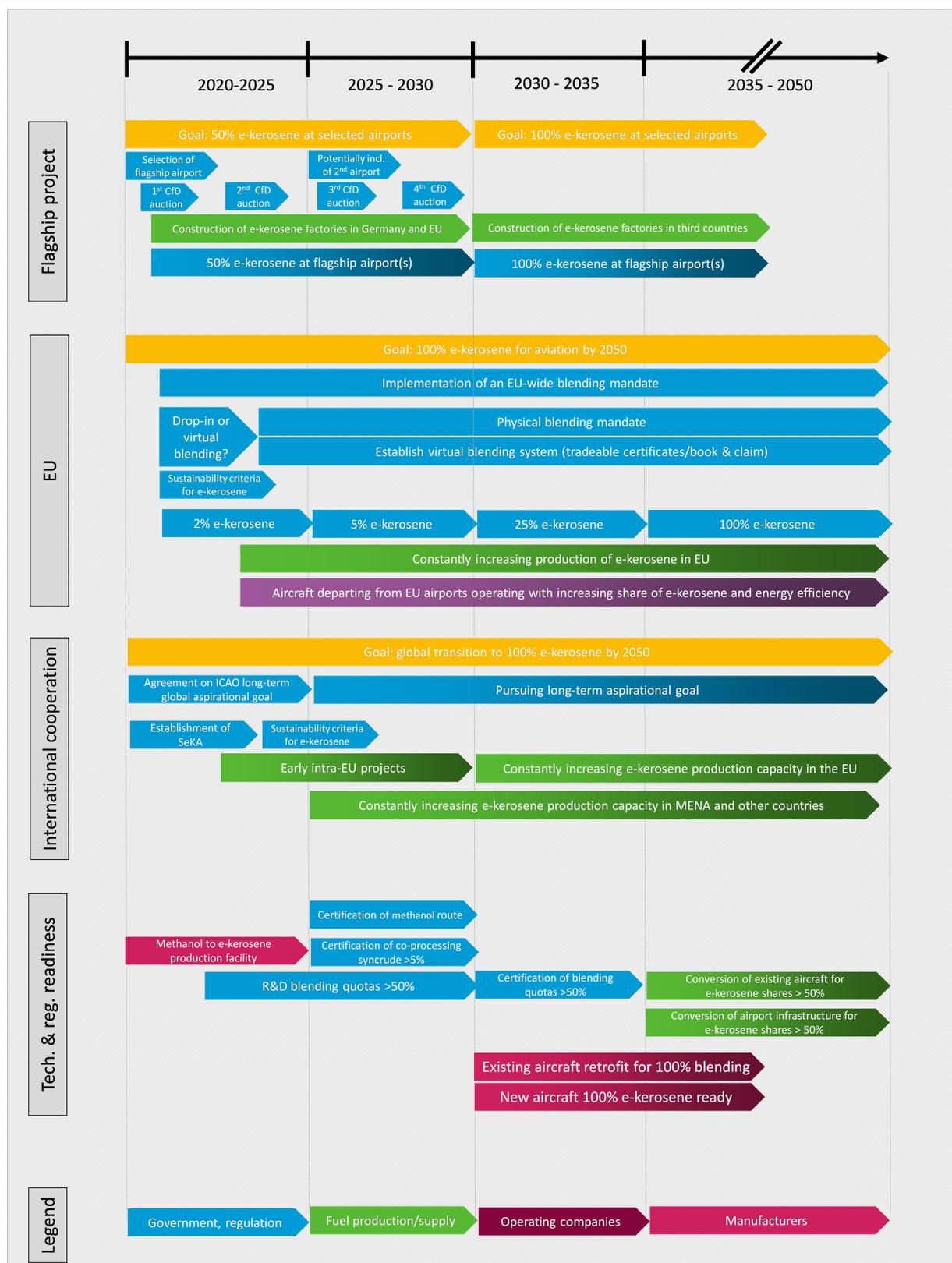
Es werden auch einige Änderungen an der Bodeninfrastruktur und den Verfahren erforderlich sein, so dass für diese Änderungen ausreichend Zeit eingeplant werden sollte. Die Vermischung sollte bereits in der Raffinerie erfolgen (DBFZ 2019) und Misch tanks könnten erforderlich sein. Solange die Beimischungsquoten unter 50% bleiben, sind keine Änderungen an den Flughäfen oder an den Flugzeugen erforderlich; dies lässt mehr als genug Zeit, um die Infrastruktur für höhere Beimischungsanteile vorzubereiten, dies wird aber erforderlich sein, sobald die ASTM-Zulassung erreicht ist und die Beimischungsanteile deutlich steigen. Bis 2040 sollten alle Flughäfen in der Lage sein, entsprechend den Anforderungen für den Luftverkehr über 50% Beimischungsquoten hinauszugehen; dies ist ggf. durch entsprechende Regulierung sicherzustellen.

5.4 Übersicht

Abbildung 11 gibt einen Überblick über die vorgeschlagenen Initiativen und Aktivitäten, die oben erörtert wurden und erweitert das Bild um einige Aktivitäten, die oben nicht ausdrücklich erwähnt wurden. Im Fahrplan wird zwischen den verschiedenen Arten von Beteiligten unterschieden: Regierungen, welche die rechtlichen Vorschriften für die Durchführung der erforderlichen Maßnahmen durch Kraftstoffhersteller und -lieferanten sowie durch Flugzeugbetreiber und -hersteller festlegen. Darüber hinaus werden indikative Ziele vorgeschlagen, die letztendlich politisch diskutiert und vereinbart werden müssen sowie ein indikativer 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 Einblendung dunklerer Farben zeigt an, dass die Anstrengungen oder die Stringenz der Intervention mit der Zeit intensiviert werden müssen.

¹⁸ Weitere Einzelheiten darüber, wie sich der SeKA in eine internationale Strategie zur Förderung synthetischer E-Kraftstoffe in allen schwer abbaubaren Sektoren einfügen würde, finden Sie unter UBA (2021).

Abbildung 11: Fahrplan für die Luftfahrt



Quelle: Eigene Zusammenstellung des Autors

Der Fahrplan zeigt, dass die ersten Schritte sofort unternommen werden müssen (Flaggschiffprojekt, EU-Politik, internationale Zusammenarbeit). 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 2030 sind entscheidend, um die Defossilisierung des Luftverkehrs 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.

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 sicherlich 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 Schlüsseländern 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

- Airbus (2019). Global Market Forecast, Cities, Airports & Aircraft 2019-2038. Airbus, 2019. Online verfügbar unter <https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/strategy/global-market-forecast/GMF-2019-2038-Airbus-Commercial-Aircraft-book.pdf>, letzter Zugriff am 31. Januar 2021.
- ATAG - Aktionsgruppe Luftverkehr (2020). Waypoint 2050, Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency. Air Transport Action Group, 2020. Online verfügbar unter https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf, letzter Zugriff am 6. April 2021.
- 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.
- Boeing (2020). Kommerzieller Marktausblick 2020-2039. Boeing, 2020. Online verfügbar unter [C:\Benutzer\m.cames\Dokumente\&Oeko\Themen\Verkehr\Aviation\Boeing\Boeing \(2020\) Commercial Market Outlook 2020-2039.pdf](C:\Benutzer\m.cames\Dokumente\&Oeko\Themen\Verkehr\Aviation\Boeing\Boeing (2020) Commercial Market Outlook 2020-2039.pdf), letzter Zugriff am 31. Januar 2021.
- BP - British Petroleum (2019): Energy Outlook, British Petroleum. Online verfügbar unter <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>, letzter Zugriff am 8. Mai 2020.
- Brynolf, S.; Taljegard, M.; Grahn, M.; Hansson, J. (2017): Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. Göteborg, 2017.
- Bundesregierung (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie, Schlüsselement der Energiewende. Online verfügbar unter <https://www.bmbf.de/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>, letzter Zugriff am 26. Juni 2020.
- CTH - Chalmers University of Technology; IVL - Swedish Environmental Research Institute (2017): Brynolf, 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.
- DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum (2019): Bullerdiel, N.; Buse, J.; Dögnitz, N.; Feige, A.; Halling, A.-M.; Hauschild, S.; Hawighorst, P.; Kaltschmitt, M. Einsatz von Multiblend JET A-1 in der Praxis, Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Modellvorhaben der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Deutsches Biomasseforschungszentrum, 2019. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/demo-spk-endbericht.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff am 23. Oktober 2020.
- 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.
- DHL - Deutsche Post DHL Group (2019): White Paper: Nachhaltige Kraftstoffe für die Logistik, Status. Opportunities. Solutions., 17 Oct 2019. Online verfügbar unter <https://www.dpdhl.com/content/dam/dpdhl/en/media-center/responsibility/dpdhl-whitepaper-sustainable-fuels-for-logistics.pdf>, letzter Zugriff am 22. November 2020.
- DIW Econ; LBST; MKmetric; TU Darmstadt; UNICONSULT; Waldeck RA (2015): Grundlagenermittlung für ein Luftverkehrskonzept der Bundesregierung. Online verfügbar unter <http://www.fluglaerm-rhein-main.de/wp-content/uploads/2016/03/2015-11-BundesVerkehrsministerium-Grundlagen-Luftverkehrskonzept.pdf>, letzter Zugriff am 8. Mai 2020.
- EASA - European Union Aviation Safety Agency (2019). European Aviation Environmental Report. European Union Aviation Safety Agency (Europäische Agentur für Flugsicherheit), 2019. Online verfügbar unter https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_HI-RES_190311.pdf, letzter Zugriff am 31. Januar 2021.
- Ecoinvent Centre (2018). ecoinvent database v3.5. Ecoinvent-Zentrum. Ecoinvent-Zentrum (Hrsg.), 2018.

- Embraer (2018): Market Outlook 2018-2037., 2018. Online verfügbar unter https://www.embraermarketoutlook2019.com/wp-content/uploads/2018/07/Embraer_MarketOutlookBook_2018_DownloadablePDF_A4.pdf.
- EUROCONTROL (2018): European Aviation in 2040. Challenges of Growth., 2018. Online verfügbar unter <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/official-documents/reports/challenges-of-growth-2018.pdf>.
- 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.
- Gelhausen, M. C.; Berster, P.; Wilken, D. (2019): Airport capacity constraints and strategies for mitigation, A global perspective: Academic Press.
- 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.
- IATA - Internationaler Luftverkehrsverband (2020). Infografik zur Passagierprognose. Internationaler Luftverkehrsverband, 2020. Online verfügbar unter <https://www.iata.org/contentassets/e938e150c0f547449c1093239597cc18/pax-forecast-infographic-2020-final.pdf>, letzter Zugriff am 31. Januar 2021.
- ICAO - Internationale Zivilluftfahrtorganisation (2018). Langfristige Verkehrsprognosen, Paenger und Fracht. Internationale Zivilluftfahrt-Organisation, 2018. Online verfügbar unter https://www.icao.int/sustainability/Documents/LTF_Charts-Results_2018edition.pdf, letzter Zugriff am 31. Januar 2021.
- ICAO - Internationale Zivilluftfahrt-Organisation (2019). Entschließung A40-18: Konsolidierte Erklärung zur Fortführung der ICAO-Politik und -Praxis im Bereich des Umweltschutzes - Klimawandel, 40. Tagung der ICAO-Versammlung. Internationale Zivilluftfahrt-Organisation, 2019. Online verfügbar unter https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Assembly/Resolution_A40-18_Climate_Change.pdf, letzter Zugriff am 7. April 2021.
- ICAO - Internationale Zivilluftfahrtorganisation (2020). Auswirkungen des neuartigen Coronavirus (COVID-19) auf die Zivilluftfahrt Analyse der wirtschaftlichen Auswirkungen. Internationale Zivilluftfahrt-Organisation. Montreal, 2020. Online verfügbar unter <https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO%20COVID%202020%2011%2018%20Economic%20Impact.pdf>, letzter Zugriff am 31. Januar 2021.
- ICAO (2016): ICAO Long-Term Traffic Forecasts, Passenger and Cargo, International Civil Aviation Organization. Online verfügbar unter <https://www.icao.int/safety/ngap/NGAP8%20Presentations/ICAO-Long-Term-Traffic-Forecasts-July-2016.pdf>, zuletzt aktualisiert am 2016, letzter Zugriff am 8. Mai 2020.
- ICCT - Internationaler Rat für sauberen Verkehr (2019): Searle, S.; Pavlenko, N.; Kharina, A.; Giuntoli, J. Long-term aviation fuel decarbonization: Progress, Roadblocks, and Policy Opportunities International Council on Clean Transportation, Briefing,. International Council on Clean Transportation, 2019. Online verfügbar unter https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Alternative_fuel_aviation_briefing_20190109.pdf.
- ICCT - Internationaler Rat für sauberen Verkehr (2020). Treibstoffverbrauch von neuen Verkehrsflugzeugen: 1960 to 2019. Internationaler Rat für sauberes Verkehrswesen, 2020. Online verfügbar unter <https://theicct.org/sites/default/files/publications/Aircraft-fuel-burn-trends-sept2020.pdf>, letzter Zugriff am 6. November 2020.
- IEA - Internationale Energieagentur (2016). World Energy Outlook. International Energy Agency. Paris, 2016.
- IEA - Internationale Energieagentur (2018). World Energy Outlook. International Energy Agency. Paris, 2018. Online verfügbar unter https://webstore.iea.org/download/direct/2375?fileName=World_Energy_Outlook_2018.pdf, letzter Zugriff am 31. Januar 2021.
- IEA - Internationale Energieagentur (2020a). Wichtige Weltenergiestatistiken. Internationale Energieagentur, 2020. Online verfügbar unter https://webstore.iea.org/download/direct/4093?fileName=Key_World_Energy_Statistics_2020.pdf, letzter Zugriff am 31. Januar 2021.
- IEA - Internationale Energieagentur (2020b): Tracking Transport, Aviation, Internationale Energieagentur. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>, letzter Zugriff am 31. Januar 2021.
- IEA - Internationale Energieagentur (2020c): Weltenergiebilanzen, Internationale Energieagentur, letzter Zugriff am 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.

- 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.
- 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.
- Kharina, A. (2018): Kinks in the pipeline: A survey of downstream alternative jet fuels challenges | International Council on Clean Transportation, International Council on Clean Transportation. Online verfügbar unter <https://theicct.org/blog/staff/kinks-pipeline-survey-downstream-alternative-jet-fuels-challenges>, zuletzt aktualisiert am 31. Oktober 2018, letzter Zugriff am 23. Juni 2020.
- Lee, D. S.; Fahey, D. W.; Skowron, A.; Allen, M. R.; Burkhardt, U.; Chen, Q.; Doherty, S. J.; Freeman, S.; Forster, P. M.; Fuglestedt, J.; Gettelman, A.; León, R. R. de; Lim, L. L. et al. (2021): Der Beitrag des globalen Luftverkehrs zum anthropogenen Klimaerwärmung für 2000 bis 2018. *Atmospheric Environment* 244, S. 117834. DOI: 10.1016/J.ATMOENV.2020.117834.
- 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.
- Prognos - Prognos AG (2020): Kreidelmeyer, S.; Dambeck, H.; Krichner, A.; Wunsch, M. Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Prognos AG, 2020. Online verfügbar unter <C:\Users\m.cames\Documents\Download\transformationspfade-fuer-strombasierte-energetraeger.pdf>, letzter Zugriff am 16. Mai 2021.
- Scheelhaase, J.; Maertens, S.; Grimme, W. (2019): Synthetische Kraftstoffe in der Luftfahrt - Aktuelle Barrieren und mögliche politische Maßnahmen. In: *Transportation Research Procedia* 43, pp. 21-30. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.12.015.
- Schmidt, P.; Weindorf, W.; Roth, A.; Batteiger, V.; Riegel, F. (2016): Power-to-Liquids, Potenziale und Perspektiven für die zukünftige Versorgung mit erneuerbarem Flugkraftstoff, 2016.
- Shell (2018): Sky. Meeting the goals of the Paris Agreement, 2018. Online verfügbar unter <https://mronline.org/wp-content/uploads/2018/11/shell-scenario-sky.pdf>.
- Solarify.eu (2019): Wüsten-Wasserstoff: Neuer Anlauf mit Desertec 3.0, 10 Jahre Dii Desert Energy - Jahrestagung mit Ghorfa in Berlin, Solarify.eu. Online verfügbar unter <https://www.solarify.eu/2019/11/26/582-wuesten-wasserstoff-neuer-anlauf-mit-desertec-3-0/>, zuletzt aktualisiert am 26. November 2019, letzter Zugriff am 6. Dezember 2020.
- thinkstep AG (Hrsg.) (2018). GaBI 6.0, 2018.
- Thompson, D. (28. Februar 2013): How Airline Ticket Prices Fell 50 Percent in 30 Years (And Why Nobody Noticed), Thank deregulation, competition, the internet, and fees. Ja, danke den Gebühren. In: *The Atlantic*, 28. Februar 2013. Online verfügbar unter <https://www.theatlantic.com/business/archive/2013/02/how-airline-ticket-prices-fell-50-in-30-years-and-why-nobody-noticed/273506/>, letzter Zugriff am 26. Oktober 2020.
- UBA - Umweltbundesamt (2018): Maibach, M.; Peter, M.; Killer, M.; Bieler, C.; Zandonella, R.; Notter, B.; Bertschmann, D. Szenario Luftverkehr Deutschland unter Einbezug von Umweltaspekten (Texte, 109/2018). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, 2018. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-12-14_texte_109-2018-nachhaltige-gueterinfrastruktur.pdf, letzter Zugriff am 8. Mai 2020.

UBA - Umweltbundesamt (2019): 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.