

Endbericht | April 2024

Effiziente Synthese und Rückverstromung von E-Fuels (ESyRE)

Policy Paper

Teilbericht 3.2

AP 3.4 im Rahmen des Teilvorhabens
Umweltwirkungsanalyse, regulatorische
Rahmenbedingungen und Akzeptanz

Forschungsvorhaben 03EN5003C

Projektlaufzeit: 01.02.2021 - 31.07.2023

Thomas Götz

Lena Tholen

Thomas Adisorn

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



**Wuppertal
Institut**

Dieser Bericht ist Ergebnis des Teilvorhabens „Umweltwirkungsanalyse, regulatorische Rahmenbedingungen und Akzeptanz“ (Förderkennzeichen 03EN5003C) im Rahmen des Verbundvorhabens „Effiziente Synthese und Rückverstromung von E-Fuels“ (ESyRE).

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Götz, T., Tholen, L., Adisorn, T. (2024). Effiziente Synthese und Rückverstromung von E-Fuels (ESyRE): Policy Paper, Teilbericht 3.2, AP 3.4. Wuppertal Institut.

Projektlaufzeit: 01.02.2021 - 31.07.2023

Projektpartner:

Fraunhofer IKTS, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme
(Projektkoordination des Verbundvorhabens)

Winterbergstraße 28
01277 Dresden

EBZ GmbH, Entwicklungs- und Vertriebsgesellschaft Brennstoffzelle mbH
Marschnerstraße 26
01307 Dresden

Impressum

Herausgeberin:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Ansprechperson:

Thomas Götz
Co-Leiter des Forschungsbereichs Energiepolitik
Abteilung Energie-, Verkehrs- und Klimapolitik
thomas.goetz@wupperinst.org
Tel.: +49 202 2492-213

Stand:

April 2024

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	4
Abbildungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
2 Hintergrund: Power-to-X und Projekthintergrund ESyRE	9
2.1 Überblick Power-to-X	9
2.2 Technologieentwicklung bei ESyRE	11
2.2.1 Power-to-Liquids / Power-to-Diesel	12
2.2.2 Rückverstromung mit Hilfe einer Brennstoffzelle / SOFC-APU	13
2.2.3 Mögliche Anwendungsfälle bei ESyRE	13
3 Bestehende Strategien und Instrumente zur Förderung von PtL	15
3.1 Deutschland	15
3.2 Europa	21
3.3 Kurzbewertung des bestehenden Politikrahmens	29
4 Herausforderungen und Chancen für die Politik	31
4.1 Herausforderungen	31
4.2 Chancen	32
5 Fazit und Empfehlungen an die Politik	34
6 Literaturverzeichnis	38

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

AFID	Alternative Fuels Infrastructure Directive
AFIR	Alternative Fuels Infrastructure Regulation
APU	Auxiliary power unit
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
CAPEX	Capital Expenditure
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ESyRE	Effiziente Synthese und Rückverstromung von E-Fuels
EU	Europäische Union
LKW	Lastkraftwagen
MWIDE	Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie
NRMM	Non-Road Mobile Machinery
NRW	Nordrhein-Westfalen
OPEX	Operational Expenditure
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PKW	Personenkraftwagen
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
RED	Renewable Energy Directive
REDII	Renewable Energy Directive II
REDIII	Renewable Energy Directive III
RFNBO	Renewable Fuels of Non-Biological Origin
SAF	Sustainable Aviation Fuels
SOEC	Solid oxide electrolyzer cell
SOEL	Solid oxide water electrolysis
SOFC	Solid oxide fuel cell
THG	Treibhausgas

Einheiten und Symbole

%	Prozent
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
GW	Gigawatt
GW _{el}	Gigawatt elektrisch
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoffe
N ₂	Stickstoff
NO _x	Stickoxide
PM	Rußpartikel
TWh	Terrawattstunden

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung unterschiedlicher PtX – Prozesse und Anwendungsbeispiele -----	10
Abbildung 2: Vereinfachte schematische Darstellung der ESyRE Demonstrationsanlage -----	12
Abbildung 3: Bahn-Elektrifizierungsprogramm des Bundes -----	17
Abbildung 4: Fahrplan der PtL-Roadmap-----	18
Abbildung 5: Rahmenbedingungen für die Etablierung von PtL-Geschäftsmodellen -----	34

1 Einleitung

Der Ausbau erneuerbarer Energien spielt eine zentrale Rolle, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und die Klimaziele zu erreichen. Insbesondere zur Stromerzeugung hat der Anteil der erneuerbaren Energien in den letzten Jahren stark zugenommen. Ein Sektor, der hingegen weiterhin von fossilen Energieträgern geprägt ist, ist der Verkehr. Dieser Bereich bleibt bislang als „Sorgenkind“ hinter den Klimazielen zurück (Viebahn et al., 2018). Dabei sind wirksame Strategien bekannt, um die Emissionen zu reduzieren. Unter anderem sollen im Verkehr die Emissionen durch Elektromobilität und alternative Kraftstoffe (wie synthetische Kraftstoffe) reduziert werden. Neben der Elektrifizierung wurde in den vergangenen Jahren auf biogene Kraftstoffe gesetzt, die allerdings aufgrund der nicht erfüllten Nachhaltigkeitskriterien keine umfassende Alternative zu fossilen Kraftstoffen darstellten.

Die Diskussion ist damit nicht am Ende und nimmt durch die Weiterentwicklung synthetischer Kraftstoffe aus Basis von Wasserstoff wieder Fahrt auf. Ein Beispiel ist die Eröffnung der ersten Anlage in Deutschland, die synthetisches Kerosin im industriellen Maßstab herstellt und täglich eine Tonne Rohkerosin erzeugt (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2021) sowie die Gründung des Praxislabors für klimafreundliche Kraftstoffe in Cottbus (PtX Lab Lausitz, o. J.). Darüber hinaus plant die Deutsche Bahn, fossile Kraftstoffe (Diesel) bis 2040 vollständig aus der Flotte zu verbannen (Deutsche Bahn AG, 2022).

Auch die Politik hat reagiert und erste Strategiepapiere, Ziele und konkrete Maßnahmen formuliert, um das Thema weiter voranzutreiben. Hervorzuheben ist hierbei die Power-to-Liquid (PtL) Roadmap, die von der Bundesregierung 2021 veröffentlicht wurde und die Entwicklung synthetischer Kraftstoffe in den Fokus gerückt hat. In der Roadmap wird ein klarer Fokus auf die Luftfahrt und synthetisches Kerosin gesetzt, da dieser Bereich zu erheblichen Treibhausgasemissionen führt und bislang keine praxistauglichen Alternativen zur Verfügung stehen. Aus dem gleichen Grund erhält die Luftfahrt auch in Deutschland durch die Einführung einer Beimischquote weitere Aufmerksamkeit. Auf EU-Ebene wird eine Quotenlösung als zentrale Maßnahme für die Förderung von synthetischem Kerosin vorgesehen.

Dabei ist der Luftverkehr nur ein Bereich, der für die Reduktion von Emissionen im Verkehr relevant ist. Potenziale für synthetische Kraftstoffe bestehen auch bei anderen speziellen Anwendungsfällen, wie im Bereich der „Non-Road Mobile Machinery (NRMM)“, womit unter anderem Schienenfahrzeuge und Landwirtschaftsmaschinen erfasst werden¹.

Im Projekt ESyRE werden die Potenziale von PtL-Verfahren untersucht und Optionen erprobt, um den Bereich Mobilität klimafreundlicher zu gestalten. Neben den Möglichkeiten, die PtL-Kraftstoffe bieten, wird im Projektkontext auch die effiziente Rückverstromung mittels einer Diesel-Festoxid-Brennstoffzelle (Solid Oxid Fuel Cell, SOFC) untersucht, um eine vom Hauptantrieb unabhängige Bordstromversorgung zu ermöglichen (APU, auxiliary power unit). International stehen APUs unter anderem

¹ Die Verordnung (EU) 2016/1628 („NRMM-Verordnung“) definiert Maschinen und Geräte, die unter den Begriff „Non-Road Mobile Machinery“ fallen

zur Förderung der Luftqualität auf der politischen Agenda (siehe bspw. California Air Resources Board, o. J.).

Insgesamt ist das Thema PtL noch relativ neu auf der politischen Agenda und die Gestaltung eines umfassenden Politikpakets steht erst am Anfang. Daher ist es entscheidend, die technischen Möglichkeiten zu erkennen und bestehende technische, ökologische, ökonomische, infrastrukturelle und gesellschaftliche Herausforderungen zu identifizieren. Die Politik ist gefordert, zeitnah ein Politikpaket umzusetzen, das diese Herausforderungen adressiert und den zielgerichteten Einsatz von PtL in sinnvollen Anwendungsbereichen unterstützt. Gerade mit Blick auf die ambitionierten Klimaziele ist es erforderlich, alle Potenziale schnell zu ermitteln, Strategien zu entwickeln und Fahrpläne mit konkreten Gestaltungsoptionen umzusetzen.

2 Hintergrund: Power-to-X und Projekthintergrund ESyRE

Im Projekt ESyRE - „Effiziente Synthese und Rückverstromung von E-Fuels“ wird die Technologie für einen speziellen Power-to-X-Pfad weiterentwickelt und für bestimmte Anwendungsfälle erforscht. Dieses Kapitel skizziert kurz die technischen Hintergründe, um im Folgenden einordnen zu können, inwiefern politische Rahmenbedingungen und Instrumente diese Technologie adressieren.

2.1 Überblick Power-to-X

Mitte des Jahres 2021 hat die Bundesregierung ihre Klimaziele verschärft mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045. Um dies zu erreichen sind unterschiedliche Strategien erforderlich: Neben dem Ausbau erneuerbarer Energien und der Steigerung der Energieeffizienz bilden Power-to-X-Technologien eine weitere Säule zur Umsetzung der Energiewende. Bei Power-to-X wird Power, also elektrischer Strom zu X, also unterschiedlichen Stoffen umgewandelt, wobei bei diesem Umwandlungsprozess prinzipiell Wasser mit Hilfe von Strom durch Elektrolyse aufgespalten wird. Der dadurch entstandene Wasserstoff wird dabei entweder direkt genutzt oder weiterverarbeitet. Bei den Power-to-X-Technologien wird unterschieden zwischen:

- **Power to Gas:** Hierbei handelt es sich um ein Verfahren zur Herstellung von synthetischen Gasen, insbesondere Wasserstoff und Methan
- **Power to Chemicals:** Hierbei wird der Wasserstoff zu chemischen Syntheseprodukten weiterverarbeitet, wie etwa Methanol und Ammoniak
- **Power to Liquids:** Hierbei handelt es sich um die Weiterverarbeitung des Wasserstoffs zu flüssigen, synthetischen Kraft- und Brennstoffen, wie Benzin, Diesel oder Kerosin bzw. entsprechenden Rohstoffen (Feedstocks) in der Petrochemie

Die folgende Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Power-to-X-Verfahren und zeigt beispielhafte Einsatzgebiete.

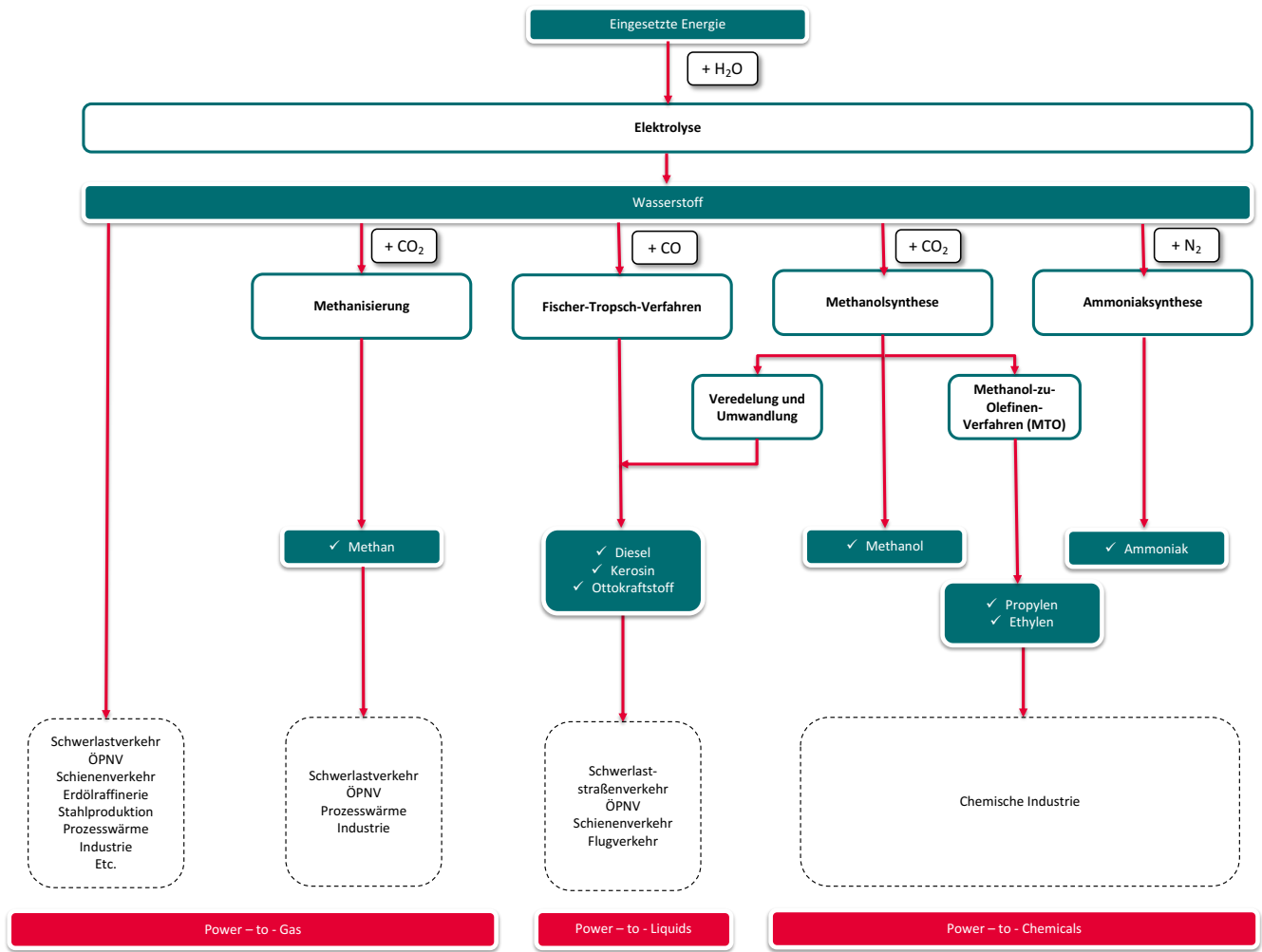


Abbildung 1: Schematische Darstellung unterschiedlicher PtX – Prozesse und Anwendungsbeispiele

Quelle: eigene Abbildung basierend auf Wilms et al., 2018

Um tatsächlich einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, ist es essentiell, dass unter anderem der Strom, der zur Produktion von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten verwendet wird, aus zusätzlichen erneuerbaren Energien stammt. Daher muss aus Sicht des Klimaschutzes Wasserstoff dahingehend unterschieden werden, wie dieser hergestellt wurde. Kommt der Strom aus erneuerbaren Energien, so kann Wasserstoff weitgehend als klimaneutral bezeichnet werden. Es gibt aber auch andere Möglichkeiten, wie die folgende Infobox zeigt. Um ein gemeinsames Verständnis zu bekommen, wurde den unterschiedlichen Varianten Farben zugeordnet.

Infobox: Die Wasserstoff-„Farbenlehre“

- **Grüner Wasserstoff:** Hierbei kommt für die Elektrolyse Strom aus erneuerbaren Energien zum Einsatz. Um tatsächlich einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, sollte die Energie aus *zusätzlichen*, d.h. eigens zu diesem Zweck neu errichteten erneuerbaren Energiequellen stammen.
- **Gelber Wasserstoff:** In diesem Fall kommt der Strom für die Elektrolyse aus dem durchschnittlichen Strommix.
- **Grauer Wasserstoff:** Der benötigte Strom stammt hierbei aus fossilen Brennstoffen, wie Erdgas oder Kohle. In der Regel wird mit Hilfe von Dampfreformierung Erdgas in Wasserstoff und CO₂ umgewandelt.
- **Blauer Wasserstoff:** Im Prinzip handelt es sich bei blauem Wasserstoff um grauen Wasserstoff, allerdings wird das CO₂, das bei der Herstellung entsteht, abgeschieden oder gespeichert (Carbon Capture and Storage, CCS).
- **Türkiser Wasserstoff:** Hierbei wird Wasserstoff mit Hilfe der Methanpyrolyse hergestellt, also der thermischen Spaltung von Methan. Es entsteht Wasserstoff und fester Kohlenstoff, der nicht in die Atmosphäre freigesetzt wird.

2.2 Technologieentwicklung bei ESyRE

Im Projekt ESyRE wird von den zuvor dargestellten Power-to-X-Möglichkeiten ein spezieller Pfad näher betrachtet: Power-to-Liquids, also die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen, wie Diesel, Benzin und Kerosin.

Neben der effizienten Herstellung dieser Kraftstoffe mit Hilfe einer Hochtemperatur-Co-Elektrolyse und des Fischer-Tropsch-Verfahrens werden im Projektkontext in einem zweiten Schritt spezielle Anwendungsfälle untersucht. Hierbei wird neben der Nutzung von synthetischen Kraftstoffen auch die Rückverstromung mittels einer SOFC untersucht.

Abbildung 2 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Forschungsvorhabens. Im folgenden Kapitel werden die beiden Schritte (oberer linker und unterer rechter Teil der Abbildung) kurz erläutert.

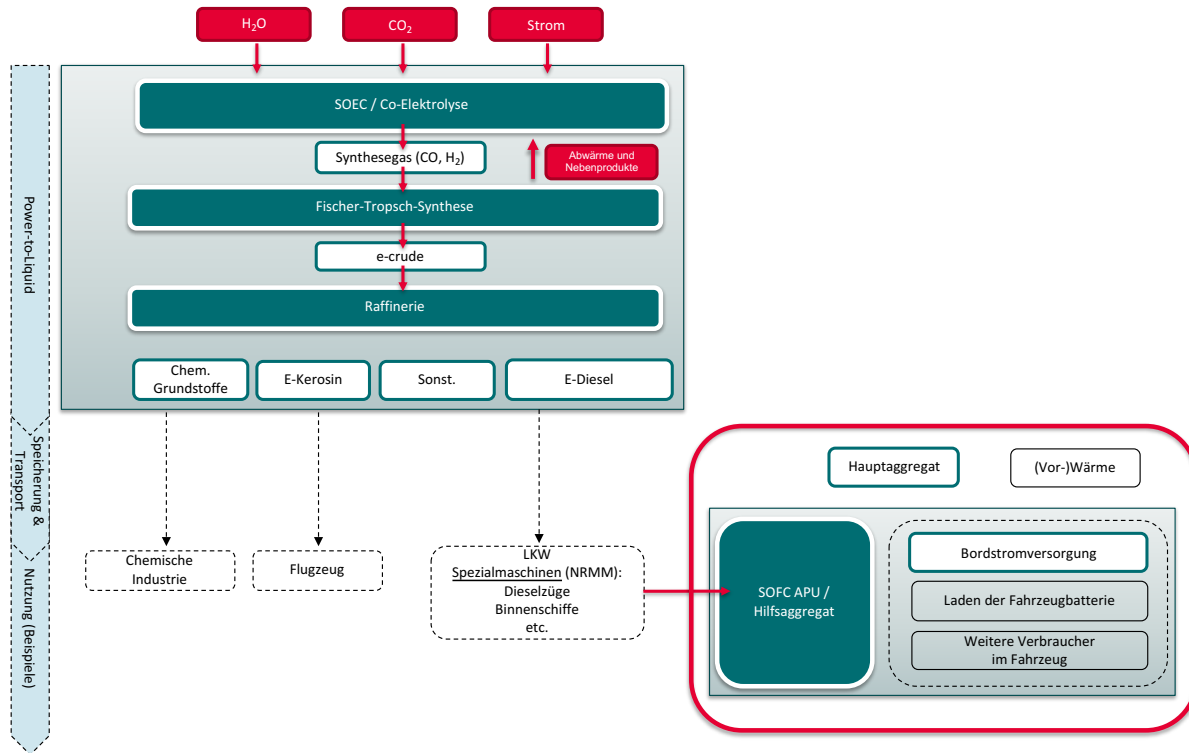


Abbildung 2: Vereinfachte schematische Darstellung der ESyRE Demonstrationsanlage

Quelle: eigene Abbildung

2.2.1 Power-to-Liquids / Power-to-Diesel

In einem ersten Schritt wird im Projekt ESyRE durch Festoxid/Hochtemperatur-Co-Elektrolyse (Co-SOEC) zunächst Synthesegas und schließlich mit Hilfe der Fischer-Tropsch-Synthese synthetischer Kraftstoff, wie Benzin und Diesel, sowie weitere flüssige Kohlenwasserstoffe hergestellt. Die Technologie zeichnet sich dadurch aus, dass sie besonders effizient arbeitet.

Das entscheidende an der Technologie ist zunächst die Co-Elektrolyse, in der durch elektrochemische Umwandlung Synthesegas entsteht. Als Ausgangsstoffe sind hierfür Wasser, Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Strom erforderlich. Um tatsächlich einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, muss der Strom von (zusätzlichen) erneuerbaren Energiequellen stammen und der Gesamtprozesse so effizient wie möglich gestaltet werden. Als CO₂-Quellen stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, wie biogene Quellen, Direct-Air-Capture (die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre) oder Industrieanlagen (Fritsch et al., 2021). Anders als in herkömmlichen Power-to-Liquid-Verfahren ist bei der Co-Elektrolyse nur ein Prozessschritt notwendig, um das für die anschließende Fischer-Tropsch-Verfahren erforderliche Synthesegas, also ein Gemisch hauptsächlich aus Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂), herzustellen. Bei der Fischer-Tropsch-Synthese werden anschließend aus diesem Synthesegas langkettige Kohlenwasserstoffe hergestellt, E-Crude (bzw. synthetisches Rohöl) genannt. Durch eine weitere Verarbeitung in der Raffinerie (Hydrocracking, Isomerisierung) werden daraus e-fuels, wie Benzin, Diesel und Kerosin hergestellt. Auch Stoffe, die in der Chemieindustrie eingesetzt werden, wie Naphtha und spezielle Wachse, entstehen bei der Fischer-Tropsch-Synthese als Koppelprodukte.

Gleichzeitig entsteht bei diesem Prozess Abwärme, die wiederum für die Herstellung von Synthesegas genutzt wird und das System besonders effizient macht.

Die bei diesem Verfahren hergestellten e-fuels sind in ihren Eigenschaften vergleichbar mit konventionellem Benzin, Diesel und Kerosin und können damit in den meisten Fällen dort eingesetzt werden, wo auch heute diese Kraftstoffe eingesetzt werden („drop-in-ready“). Wird für die Herstellung erneuerbarer Strom verwendet, können e-fuels klimafreundlich hergestellt werden und eine Alternative zu fossil hergestellten Kraftstoffen darstellen. Zudem kann die bestehende Erdöl-Infrastruktur (Häfen, Tanklager, Pipelines, Raffinerie, Tankstellen etc.) zu großen Teilen weiterverwendet werden, was zudem auch Transport, Speicherung und Verteilung großer Energiemengen über längere Strecken und Zeiträume erlaubt.

2.2.2 Rückverstromung mit Hilfe einer Brennstoffzelle / SOFC-APU

In einem zweiten Schritt wird im Projekt ESyRE der zuvor hergestellte synthetische Kraftstoff mittels Rückverstromung für verschiedene Anwendungsfälle (siehe Kapitel 2.2.2) genutzt.

Dafür wird eine Hochtemperatur-Brennstoffzelle verwendet, die mit Hilfe einer elektrochemischen Reaktion Energie und Wärme produzieren kann. Die SOFC kann grundsätzlich mit unterschiedlichen Stoffen betrieben werden, wie Wasserstoff und Methan, aber bei Einsatz eines geeigneten vorgeschalteten Reformers auch mit Diesel. Anders als bei einer Batterie kann die Brennstoffzelle so lange Strom liefern, wie Brennstoff im Tank vorhanden ist. Durch einen modularen Aufbau kann die Brennstoffzelle optimal an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden.

Im Projekt ESyRE soll die Brennstoffzelle genutzt werden, um eine vom Hauptantrieb unabhängige APU anzutreiben. Neben Strom entsteht auch Wärme, das ebenfalls für unterschiedliche Anwendungen eingesetzt werden kann. Der Anteil Strom zu Wärmeversorgung ist dabei bedarfsgerecht modulierbar.

2.2.3 Mögliche Anwendungsfälle bei ESyRE

Power-to-Liquid wird in Zukunft voraussichtlich einen entscheidenden Beitrag leisten, um die Klimaziele zu erreichen. Insbesondere im Verkehr gibt es dabei Bereiche, die sich nur schwer oder nicht elektrifizieren lassen. In diesen Fällen können PtL-Kraftstoffe dazu beitragen, die Nutzung fossiler Energieträger und damit die Höhe der Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Wie dargestellt spielt hier der Flugverkehr eine wesentliche Rolle, da es bislang keine praxistauglichen Alternativen gibt, um die Luftfahrt v.a. auf Mittel- und Langstreckenflügen klimafreundlich zu gestalten. Aber auch für andere Anwendungsbereiche mit hohen Anforderungen an die Energiedichte der eingesetzten Energieträger wie dem Schiffs- und Straßengüterverkehr bieten PtL-Kraftstoffe eine Option, den Verkehr klimafreundlicher zu gestalten.

Ebenfalls relevant sind zudem die in der englischen Abkürzung „NRMM“ genannten „nicht straßengebundenen mobilen Maschinen“ bzw. vereinfacht „Spezialmaschinen“. Darunter fallen Schienenfahrzeuge, Baumaschinen (wie Bagger), Landwirtschafts- und Landmaschinen (wie Erntemaschinen) und sogar Binnenschiffe, die jeweils sehr leistungsstarke und damit energieintensive Antriebssysteme bei gleichzeitig großer

Autonomie erfordern. Dieser Bereich ist auch insofern relevant, dass diese schweren und ressourcenintensiv hergestellten Maschinen oft über viele Jahrzehnte genutzt werden und aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen ein frühzeitiger Austausch bzw. eine Umrüstung in vielen Fällen nicht in Frage kommt.

Von den NRMM werden im Projektkontext Triebwagen und Lokomotiven mit einem speziellen Fokus betrachtet. Insbesondere der Schienenverkehr ist dabei ein bedeutungsvoller Bereich, da weiterhin weltweit ein großer Teil der Strecken nicht elektrifiziert ist und Alternativen zu herkömmlichen Kraftstoffen erforderlich sind.

3 Bestehende Strategien und Instrumente zur Förderung von PtL

3.1 Deutschland

PtL gewinnt auf der politischen Agenda an Bedeutung

Das Thema PtL ist in der politischen Diskussion noch relativ jung und wird erst in den letzten Jahren intensiver diskutiert. PtL wird hierbei als Ergänzung zu direkt-erneuerbaren und direkt-elektrischen Dekarbonisierungsstrategien gesehen und ist damit ein relevanter Aspekt zur Erreichung der Klimaziele.

Auf der politischen Agenda steht das Thema verstärkt seit der Veröffentlichung des **Aktionsprogramm PtX** im Jahr 2019. Ein Fokus wurde hierbei insbesondere auf jene Sektoren gelegt, die sich nicht oder nur sehr schwer (direkt) elektrifizieren lassen, wie Teile der energieintensiven Industrie und des Verkehrs. Betont wurden dabei bereits die Notwendigkeit einer Verfügbarkeit von treibhausgasneutralem Strom und einer Zertifizierung dieses Stroms nach Nachhaltigkeitskriterien. Dafür sollten Demonstrationsvorhaben initiiert und der Markthochlauf getestet werden (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2019). Um das Thema weiter zu verfolgen wurde mit dem Aktionsprogramm das International PtX-Hub Berlin gegründet.

Mit dem Thema Power-to-X verbunden ist auch der grundlegende Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft, der unter anderem für die (klimafreundliche) Fischer-Tropsch-Synthese gebraucht wird. Dieses Thema hat im Jahr 2020 Aufwind bekommen, als von der damaligen Bundesregierung die **Nationale Wasserstoffstrategie** veröffentlicht wurde (BMW, 2020). Dort wurden u.a. erste Ausbaupfade für die Produktion von grünem Wasserstoff skizziert, deren Ziele durch die folgende Bundesregierung noch gesteigert wurden. Mit der Wasserstoffstrategie aus dem Jahr 2020 wurde das Ziel verfolgt, bis 2030 5 GW_{el} an Elektrolyseleistung in Deutschland herzustellen und bis 2035 weitere 5 GW_{el} hinzuzufügen. Als Anwendungsfälle wurden insbesondere die Grundstoffindustrie und der Verkehr genannt, wobei 2 GW_{el} in Raffinerien zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe eingesetzt werden sollten. Insbesondere Kerosin sollte hierdurch klimafreundlicher hergestellt werden und auch die Schifffahrt wurde als weiterer sehr relevanter Sektor für PtX-Kraftstoffe identifiziert. Zudem wurden Brennstoffzellen für den Einsatz im ÖPNV, im Schwerlastverkehr und für Nutzfahrzeugen genannt. Als politisches Instrument wurde für den Luftverkehr eine Beimischungsquote von mindestens 2 % e-Kerosin im Jahr 2030 benannt. Ferner sollte die Marktaktivierung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie im Verkehr durch finanzielle Förderung beschleunigt werden.

Im April 2022 wurde ein Fortschrittsbericht zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie veröffentlicht, der die Maßnahmen präsentiert, die bislang zur Zielerreichung umgesetzt wurden. Zudem wurden Herausforderungen und Verzögerungen in Bezug auf Umsetzungsprojekt dargestellt (Bundesregierung, 2022). Am 26. Juli 2023 hat das Bundeskabinett die Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS 2023) beschlossen. Demnach soll der Markthochlauf von Wasserstoff „deutlich beschleunigt und das Ambitionsniveau entlang der gesamten Wertschöpfungskette massiv gesteigert [werden]. Die Elektrolysekapazität im Jahr 2030 soll demnach von 5 GW auf mindestens 10 GW erhöht werden. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz

und nukleare Sicherheit, 2023a). Damit soll bis zum Jahr 2030 etwa ein Drittel des deutschen Wasserstoffbedarfs von 130 TWh gedeckt werden. Parallel dazu soll eine mit der Wasserstoffstrategie einhergehende Importstrategie entwickelt werden, da weiterhin davon ausgegangen wird, dass der größte Teil an Wasserstoff nicht in Deutschland selbst erzeugt werden kann. Dabei ist hervorzuheben, dass mit der Strategie das Ziel verfolgt wird, „maximale Synergien mit der lokalen sozial-ökologischen Gesellschafts- und Wirtschaftstransformation und Energiewende“ sicherzustellen. Um den Markthochlauf zu erreichen, soll laut Wirtschaftsminister Robert Habeck insbesondere grüner Wasserstoff gefördert werden. Im Übergang wurde allerdings auch blauer Wasserstoff aus Erdgas in Verbindung mit CCS nicht ausgeschlossen.

Der Nationale Wasserstoffrat bewertet die Fortschreibung positiv, merkt allerdings an, dass die Bundesregierung über das Jahr 2030 hinausblicken sollte, um dem voraussichtlich steigenden Bedarf frühzeitig gerecht zu werden und die Ziele bis 2030 konkretisieren sollte (Nationaler Wasserstoffrat, 2023).

Politische Entwicklungen im Verkehrssektor

Wie dargestellt gibt es grundsätzlich zahlreiche Anwendungsfälle für Power-to-Liquid und Brennstoffzellen-Technologien, wie Flugzeuge oder der Bereich der Non-Road-Mobile-Machinery. Darunter fällt auch der Schienenverkehr, der eine besondere Relevanz hat, da der Anteil der elektrifizierten Eisenbahnstecken auch in Deutschland im Jahr 2023 lediglich 62 % betrug (Statista, 2024). Der Ausbau auf 70 % (bis 2025) bzw. 2030 (bis 2030) ist zwar geplant, kommt aber bisher nur schleppend voran. Aus diesem Grund ist neben der weiteren Elektrifizierung auch der Einsatz von synthetischen, CO₂-neutralen Kraftstoffen eine vielversprechende Lösung, um den Verkehrssektor klimafreundlicher zu gestalten.

Bereits mit der **Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie** aus dem Jahr 2013 wurde der Weg geebnet für die Förderung alternativer Kraftstoffe (Bundesministerium für Verkehr, Bau und digitale Infrastruktur, 2013) und seitdem weiter vorangetrieben (siehe u.a. (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018). Speziell im Bereich Schienenverkehr wurde im Jahr 2021 das **Bahn-Elektrifizierungsprogramm des Bundes** veröffentlicht mit dem Ziel, die Eisenbahn bis 2050 100 % klimafreundlich zu gestalten (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2021d). Wo eine Elektrifizierung der Bahn aus wirtschaftlichen oder anderen Gründen (z.B. auf Nebenstrecken) nicht möglich ist, sollen alternative Antriebe und synthetische Kraftstoffe gefördert werden. Dies wird sichtbar in der vierten Säule der Abbildung 3.



Abbildung 3: Bahn-Elektrifizierungsprogramm des Bundes

Quelle: Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2021d

Zur Umsetzung der vierten Säule wurde im März 2021 die **Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr** veröffentlicht (Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr, 2021). Damit sollen bestehende Lücken im Streckennetz ohne Oberleitungen geschlossen werden. Als Alternativen sieht die Richtlinie insbesondere batterieelektrische und brennstoffzellenbasierte Züge vor. Um diese Alternativen zu fördern werden „Zuschüsse zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr“ bereitgestellt. Damit sollen u.a. Investitionskosten bei der Beschaffung innovativer Schienenfahrzeuge und beim Bau der Lade- und Betankungsinfrastruktur sowie der Elektrolyseanlagen zur Erzeugung von Wasserstoff reduziert werden.

Darüber hinaus wurde wenig später von der damaligen Bundesregierung die **Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Entwicklung regenerativer Kraftstoffe** veröffentlicht. In der Förderrichtlinie wurde verankert, dass finanzielle Mittel zwischen 2021 und 2024 in Höhe von 1,5 Milliarden Euro zur Verfügung gestellt werden. Auch solle eine Entwicklungsplattform für strombasierte Flüssigkraftstoffe aufgebaut werden.

Eine Roadmap für Power-to-Liquid

Durch die von der ehemaligen Bundesregierung im April 2021 veröffentlichten PtL-Roadmap hat das Thema PtL einen neuen Stellenwert erhalten. Hierdurch wurde erstmals speziell das Thema PtL politisch adressiert, wobei ein klarer Fokus auf den Bereich der Luftfahrt gesetzt wurde (Bundesregierung, 2021). Die PtL-Roadmap setzt vornehmlich auf einen Ersatz des fossil erzeugten Kerosins durch Kraftstoffe aus nachhaltig erzeugten erneuerbaren Energieträgern und Rohstoffen. Die Roadmap geht davon aus, dass im Flugverkehr auch langfristig auf „drop-in-fähige“ (d.h. in aktuellen Flugzeugen direkt verwendbare) Kraftstoffe gesetzt werden muss. Da die Menge an nachhaltig verfügbarer Biomasse begrenzt ist, konzentriert sich die Roadmap ausschließlich auf strombasiertes Kerosin auf Basis von grünem Wasserstoff. Mit der Roadmap wird das Ziel verfolgt, bis zum Jahr 2028 100.000 Tonnen und bis zum Jahr 2030 mindestens 200.000 Tonnen PtL-Kerosin im deutschen Luftverkehr zu verwenden. Dieser Wert entspricht 2 % des Kerosinabsatzes in Deutschland im Jahr 2019.

Aufgrund der aktuell noch geringen Verfügbarkeit und daher zu hohen Kosten von PtL-Kerosin setzt die Roadmap auf einen Instrumentenmix zum beschleunigten Markthochlauf und auf die Bereitschaft von unterschiedlichen Akteuren, sich an diesem Prozess zu beteiligen. Abbildung 4 veranschaulicht dieses Paket an politischen Maßnahmen im Rahmen der PtL-Roadmap 2021.

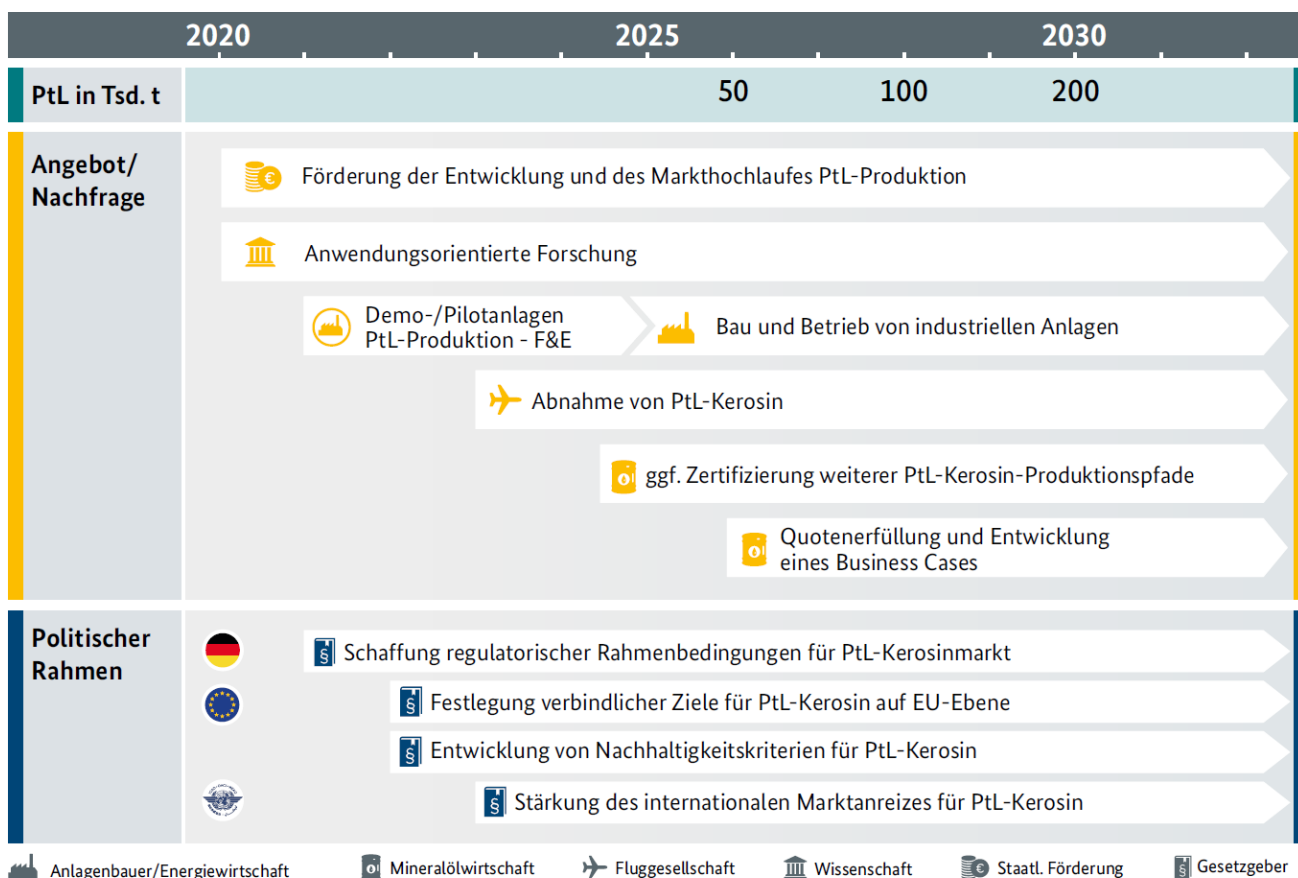


Abbildung 4: Fahrplan der PtL-Roadmap

Quelle: Bundesregierung, 2021

Am 3. August 2021, wurde zur Umsetzung der PtL-Roadmap ein Aufruf zur „Förderung der Produktion von Power-to-Liquid Kraftstoffen mit Fokus auf Kerosin“ veröffentlicht. Über 1,5 Milliarden Euro sollen in die Entwicklung und Produktion erneuerbare Kraftstoffe investiert werden (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2021a). Zudem wurde das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) damit beauftragt, gemeinsam mit Partnern eine Forschungs- und Produktionsplattform für PtL-Kerosin aufzubauen (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2021b). Einen Überblick zum Stand der Roadmap und zu umgesetzten Projekten ist unter ptl-roadmap.de zu finden.

Pläne der Bundesregierung ab 2021

Mit einer neu gewählten Bundesregierung wurden ab Dezember 2021 die Schwerpunkte der Politik geändert und Themen neu bewertet. Eine Grundlage für die Politikgestaltung dieser Bundesregierung bietet der Koalitionsvertrag, der Ende November 2021 veröffentlicht wurde.

Das Thema PtL wird hierbei vornehmlich im Bereich des Flugverkehrs diskutiert. Dort heißt es: „Deutschland soll Vorreiter beim CO₂-neutralen Fliegen werden“. Hierfür sollen Einnahmen aus der Luftverkehrssteuer u.a. in die Förderung der Produktion und des Einsatzes von CO₂-neutralen Flugkraftstoffen verwendet werden. Quoten für PtL im Luft- und Schiffsverkehr werden unterstützt, um den Markthochlauf anzuregen. Mit Bezug zum Ausbau der Wasserstoffwirtschaft wird im Koalitionsvertrag (abrufbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/gesetzesvorhaben/koalitionsvertrag-2021-1990800>) festgehalten, dass der Einsatz nicht auf bestimmte Anwendungsfälle begrenzt werden soll. Stattdessen soll PtL in allen Wirtschaftssektoren eingesetzt werden, in denen Verfahren und Prozesse nicht direkt elektrifiziert werden können. Der Ausbau erneuerbarer Energien und die Einrichtung moderner Gaskraftwerke (die H₂-ready sein sollen), soll forciert werden. Zudem soll eine europaweite Zertifizierung umgesetzt werden und Importpartnerschaften aufgebaut werden. Ein Beispiel ist eine Kooperation mit den Vereinigten Arabischen Emiraten, wo das Projekt „Green Falcon“ umgesetzt wird und von der Bundesregierung unterstützt wird (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022a).

Anfang März 2022 wurde durch das Finanzministerium kommuniziert, dass es geplant ist, bis zum Jahr 2026 etwa 200 Milliarden Euro für den Klimaschutz bereitzustellen. „Diese sollen etwa für Elektro-Ladesäulen, Wasserstoff-Erzeugung oder auch die Dämpfung der Strompreise durch Abschaffung der Umlage für Erneuerbare Energien aufgewendet werden“ (ZDF heute, 2022).

Exkurs: Aktivitäten in den Bundesländern – am Beispiel Nordrhein-Westfalen

Neben der Bundesregierung gibt es auch in den Bundesländern Pläne und Strategien, um das Thema PtL weiter zu forcieren. Das Land Nordrhein-Westfalen kann hier hervorgehoben werden, da das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie (MWIDE) im Dezember 2021 als erstes Bundesland ein **Handlungskonzept für synthetische Kraftstoffe** veröffentlicht hat (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2021a). Dort heißt es, dass „synthetische Kraftstoffe [...] ein wichtiger Baustein zur Erreichung der Klimaschutzziele in Nordrhein-Westfalen [sind]“. Wie auch in der PtL-Roadmap der Bundesregierung sollen diese dort eingesetzt werden, wo eine Elektrifizierung oder der direkte Einsatz von Wasserstoff nur schwer möglich sind, wie im Flugverkehr und in der (Hochsee-)Schifffahrt. Bei der Bedarfsanalyse wurden notwendige Mengen in Höhe von 139 TWh pro Jahr in 2050 prognostiziert. Davon sollen voraussichtlich 10 TWh in NRW hergestellt werden und die restlichen 129 TWh importiert werden. Durch die langen Investitionszyklen sollen bereits zeitnah Produktionsanlagen und eine geeignete Infrastruktur aufgebaut werden. Um die Klimaziele tatsächlich zu erreichen, soll speziell grüner Wasserstoff gefördert werden und das benötigte CO₂ aus biogenen Quellen oder Direct Air Capture gewonnen werden. In der Übergangsphase kann auch der Einsatz von blauem Wasserstoff und die Nutzung von CO₂ aus industriellen Prozessen notwendig sein. Insgesamt soll damit der Markthochlauf angereizt werden und somit der Industriestandort NRW gestärkt werden. Als Rahmenbedingungen werden ein harmonisiertes PtX-Zertifizierungssystem, die Umsetzung der Beimischquote für synthetische Kraftstoffe und die Förderung von Forschung und Entwicklung genannt. Zum Aufbau der Produktion sollen mindestens eine Demonstrationsanlage zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe mittels Fischer-Tropsch-Synthese mit einer Kapazität von 100.000 Tonnen PtL pro Jahr realisiert werden, der Aufbau einer Methanol-Synthese mit einer Kapazität von mindestens 15.000 Tonnen Methanol umgesetzt werden und eine CO₂-Infrastruktur geplant werden.

Das Handlungskonzept ist eine Strategie, um das Klimaschutzgesetz NRW zu unterstützen, das das Ziel verfolgt wird, bis 2045 klimaneutral zu werden. Zudem ist es als Ergänzung zur 2020 veröffentlichten **Wasserstoff-Roadmap** (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2020) und der **Carbon Management Strategie NRW** (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2021b) zu sehen.

NRW hat eine besondere Relevanz mit Blick auf PtL, da die vier Raffinerien in NRW eine Rohölverarbeitungskapazität von knapp 30 % am gesamten deutschen Markt haben. Hinzu kommt, dass ein Schwerpunkt der Produktion auf Kerosin (ca. 40 % der deutschen Produktion) und Naphtha (ca. 46 % der deutschen Produktion) liegt (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2021a). Da Kerosin voraussichtlich auch längerfristig für den Flugverkehr benötigt wird und Naphtha für die Chemieindustrie ein wesentlicher Rohstoff ist, wird es hier als besonders relevant gesehen, auf klimafreundliche PtL-Prozesse zu setzen.

3.2 Europa

Neben den Bestrebungen auf nationaler Ebene, verkehrsbedingte Treibhausgasemissionen zu reduzieren und PtL sowie Brennstoffzellen zu fördern, gibt es auch auf EU-Ebene Ziele und Maßnahmen, um diese Technologien zu fördern und den Klimaschutz zu stärken. Insbesondere mit der Umsetzung des European Green Deal und dem „Fit for 55“ Paket wird das Ambitionsniveau angehoben. Im Gegensatz zu Deutschland ist bislang jedoch kein Strategiepapier vorhanden, das speziell das Thema Power-to-Liquid in den Fokus rückt. Dennoch wird PtL von einigen Richtlinien mittelbar adressiert.

Saubere Fahrzeuge und Kraftstoffe

Die Förderung von Klimaschutz im Verkehr ist auch auf EU-Ebene kein neues Thema. Zu nennen sind hier mehrere Richtlinien, die in den letzten Jahren umgesetzt wurden. Die **Clean Vehicle Directive** (2009/33/EG geändert durch Richtlinie 2019/1161/EU) etwa setzt verbindliche Mindestziele für die Beschaffung emissionsarmer PKW und schwere Nutzfahrzeuge durch öffentliche Auftraggeber. In Deutschland wurde die Richtlinie durch das im Juni 2021 veröffentlichte Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz umgesetzt. Mit dem Gesetz werden unter anderem Beschaffungsquoten für LKW und Busse definiert. Seit dem 02.08.2021 müssen LKW zu 10 % alternative Kraftstoffe verwenden (Strom, Wasserstoff, Erdgas, synthetische Kraftstoffe, Biokraftstoffe). Dieser Wert erhöht sich im Jahr 2026 auf 15 %. Bei Bussen beträgt die Beschaffungsquote derzeit 45 %, wobei sich dieser Wert ebenfalls erhöht - ab dem 01.01.2025 auf 65 %. Die Hälfte der beschafften Busse muss dabei emissionsfrei sein, was zum Beispiel durch Elektro- oder Brennstoffzellenfahrzeuge erreicht werden kann. Die andere Hälfte kann durch Nutzung alternativer Kraftstoffe erreicht werden (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2021c).

Mit der Reduktion von Treibhausgasemissionen bei Kraftstoffen beschäftigt sich die **Kraftstoffqualitätsrichtlinie** (engl. Fuel Quality Directive 2009/30/EC), die seit 2009 in Kraft ist. Hierbei werden Anforderungen an die Kraftstoffqualität formuliert, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren und die Luftqualität zu verbessern. Der Geltungsbereich umfasst Kraftstoffe für Straßenkraftfahrzeuge, mobile Maschinen, und Binnenschiffe sowie elektrischen Strom, welcher für Straßenkraftfahrzeuge verwendet wird. Mit der Umsetzung der Richtlinie wurden Kraftstoffanbieter verpflichtet, die Lebenszyklustreibhausgasemissionen pro Energieeinheit des gelieferten Kraftstoffs bis 2020 um 6 % zu mindern (Art. 7a). Der Wert muss weiterhin eingehalten werden. Das Ziel konnte (und kann) erreicht werden durch Biokraftstoffe, Strom, und strombasierte Kraftstoffe. Zudem können zur Zielerreichung in den vorgelagerten Prozessen Emissionen eingespart werden.

Ebenfalls mit alternativen Kraftstoffen beschäftigt sich die **Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe** (AFIR, 2014/94/EU). Dabei werden die Mitgliedstaaten aufgefordert, einen Rahmen zu schaffen, um unter anderem Ladepunkte für Elektrofahrzeuge einzurichten und Tankstellen für Erdgas sowie Wasserstoff aufzubauen. Auch wenn synthetische Kraftstoffe keinen Schwerpunkt bilden, so werden die Mitgliedstaaten aufgefordert, aktuelle Entwicklungen im Bereich der alternativen Kraftstoffe aufzuzeigen. Mit dem AFID-Bericht der Bundesregierung ist Deutschland seiner Berichtspflicht nachgekommen. In diesem werden u.a. aktuelle Forschungsvorhaben im Bereich der synthetischen Kraftstoffe aufgezeigt (wie die Entwicklung brennstoffzellenbetriebener Züge, Diesel-Elektrische-Hybrid Loks etc.) (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019).

Im Rahmen des EU „Fit for 55“ Pakets wird die Richtlinie derzeit überarbeitet, da zum einen methodische Mängel festgestellt wurden (keine verbindliche Methodik für die Berechnung von Zielen für die Mitgliedstaaten) und weiterhin kein EU-weites Infrastrukturnetz für alternative Kraftstoffe existiert. Ein Vorschlag liegt vor (COM(2021)559), der unter anderem verbindliche nationale Ziele fordert. Am 11. Juli 2023 wurden die neuen Bestimmungen zur AFIR-Verordnung vom Europäischen Parlament angenommen.

PtL innerhalb der Renewable Energy Directive

Mit der **Erneuerbaren-Energien-Richtlinie** (Renewable Energy Directive, RED) wird die Entwicklung von erneuerbaren Energien gefördert, indem u.a. ein EU-weites Ziel festgelegt wird. Mit der im Jahr 2018 veröffentlichten Fassung (REDII) wurde das Ziel von 32 % bis 2030 festgelegt.

Ferner wurden durch die Richtlinie Kraftstofflieferanten verpflichtet, den Anteil der erneuerbaren Energien im Verkehr bis 2030 auf mindestens 14 % anzuheben. Zur Zielerreichung können auch strombasierte Kraftstoffe nicht biologischen Ursprungs (englisch: „Renewable Fuels of Non-Biological Origin“ bzw. „RFNBO“) eingesetzt werden. Diese Kraftstoffe müssen gegenüber dem fossilen Referenzwert eine Treibhausgas einsparung von mindestens 70 % erreichen.

Den Mitgliedstaaten wurde die Möglichkeit eingeräumt, über den Wert von 14 % hinauszugehen. Dementsprechend hat die Bundesregierung entschieden, diesen Zielwert zu verdoppeln und den geplanten Anteil erneuerbarer Energien im Verkehr bis 2030 auf 28 % anzuheben. In Deutschland wurden die Vorgaben der REDII durch das **Bundesimmissionsschutzgesetz** (BImSchG) umgesetzt. Hierbei wurde speziell auch das Thema Power-to-Liquid in den Fokus gerückt, indem eine Mindestquote für strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr eingeführt wurde. Diese Quote verpflichtet Inverkehrbringer von Flugkraftstoffen, einen bestimmten Mindestanteil an PtL-Kerosin bei der Kraftstoffproduktion einzuhalten, der sukzessive von 0,5 % im Jahr 2026 auf 2 % im Jahr 2030 ansteigen soll.

Die Europäische Kommission, das Europäische Parlament und der Europäische Rat haben sich Anfang 2023 auf eine weitere Neugestaltung der **Erneuerbaren-Energien-Richtlinie** (REDIII) geeinigt (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2023). Demnach soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch im Jahr 2030 auf mindestens 42,5 % ansteigen, verbunden mit dem indikativen Ziel möglichst 45 % zu erreichen.

Im Verkehrssektor haben die Mitgliedstaaten die Wahl zwischen

- der verbindlichen Zielvorgabe, die Treibhausgasintensität im Verkehrssektor durch Nutzung erneuerbarer Energieträger bis 2030 um 14,5 % zu senken, und
- der verbindlichen Zielvorgabe, bezüglich des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor bis 2030 einen Anteil erneuerbarer Energiequellen von mindestens 29 % zu erreichen.

Ein weiteres verbindliches Ziel besteht darin, mindestens 5,5 % der Gesamtmenge an Kraftstoffen im Verkehrsbereich aus einer Kombination von strombasierten erneuerbaren Kraftstoffen (RFNBOs, meist erneuerbarer Wasserstoff und wasserstoffbasierte synthetische Kraftstoffe) und fortschrittlichen Biokraftstoffen (generell aus Non-Food-Ausgangsstoffen) zu gewinnen. Von dieser Gesamtmenge sollen mindestens 1 % durch RFNBOs bereitgestellt werden (Europäischer Rat, 2023a). Weiterhin wurden Regelungen zum Genehmigungsverfahren angepasst.

Die neue Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001, der Verordnung (EU) 2018/1999 und der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates tritt bis zum 21. Mai 2025 in Kraft.

Eine europäische Wasserstoffstrategie

Ähnlich wie auf nationaler Ebene in Deutschland wurde im Jahr 2020 von der EU „eine **Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa**“ veröffentlicht (COM(2020)301). Mit der Strategie soll das Ziel verfolgt werden, in der ersten Phase zwischen 2020 und 2024 Elektrolyseure mit einer Leistung von 6 GW zu installieren und 1 Millionen Tonnen erneuerbaren Wasserstoff zu erzeugen. In der zweiten Phase von 2025 und 2030 sollen Elektrolyseure mit einer Leistung von mindestens 40 GW installiert werden, die 109 Millionen Tonnen Wasserstoff erzeugen. Bis sich die Wasserstoffproduktion mit erneuerbaren Energien wirtschaftlich rechnet, sollen Finanzierungsprogramme zur Unterstützung der Technologieentwicklung umgesetzt werden. Parallel zum Aufbau der Wasserstoffproduktion sollen zudem Fragen zur Infrastruktur und zur Zertifizierung geklärt werden. Bezüglich des Verkehrssektors wird Wasserstoff dort als vielversprechende Option gesehen, wo eine direkte Elektrifizierung schwer umsetzbar ist. Als mögliche Optionen werden Busse im öffentlichen Nahverkehr, gewerbliche Flotten (Taxis) und bestimmte Teile des Schienennetzes genannt. Bei schweren Nutzfahrzeugen wird gefordert, neben der Elektrifizierung auch den Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellen weiter zu fördern. Für Bahnstrecken, die schwer zu elektrifizieren sind, sollen die Möglichkeiten von Brennstoffzügen ausgelotet werden. Für den Luftverkehr werden neben anderen Optionen auch synthetische Kraftstoffe diskutiert.

Der europäische Green Deal

Mit dem europäischen „Green Deal“ verfolgt die EU das Ziel, bis 2050 klimaneutral zu werden, also keine Netto-Treibhausgase mehr auszustoßen. Für das Jahr 2040 wurde Anfang des Jahres 2024 ein Etappenziel von 90 % gegenüber 1990 präsentiert (COM(2024)63). Dabei sind alle Sektoren gefordert, einen Beitrag zu leisten. Eine Grundlage für Klimaschutz im Verkehrssektor bildet in den letzten Jahren die **Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität** (COM(2020)789), die 2020 im Rahmen des Green Deal veröffentlicht wurde. Zur Stärkung des Klimaschutzes sollen verkehrsbedingte Emissionen bis 2050 um 90 % reduziert werden. Neben weiteren Maßnahmen sollen im Verkehr genutzte Kraftstoffe CO₂-neutral werden und nachhaltige erneuerbare Kraftstoffe in „großem Maßstab“ eingeführt werden. Hierbei werden demnach sowohl Wasserstoffbrennstoffzellen (Unternehmensflotten, Busse, Schwerlastverkehr) als auch „Wasserstoffkraftstoffe“ (Schienenverkehr) benötigt. Auch in der Luft- und Schifffahrt sollen Emissionen durch erneuerbare und CO₂-arme flüssige und gasförmige Kraftstoffe reduziert werden.

Ein konkretes Vorgehen zur Förderung von klimafreundlichen Kraftstoffen im Rahmen des Green Deals wird im Zuge der Initiativen **ReFuelEU Aviation** und **ReFuelEU Maritime** diskutiert.

ReFuelEU Aviation Initiative

Die „ReFuelEU Aviation“ Initiative ist ein wesentlicher Teil des Pakets „Fit für 55“ mit dem Hauptziel sowohl die Nachfrage nach als auch das Angebot an nachhaltigen Flugkraftstoffen (engl. „Sustainable Aviation Fuels“, SAF) zu erhöhen und dabei gleiche Wettbewerbsbedingungen im gesamten EU-Luftverkehrsmarkt zu schaffen. Mit den neuen Rechtsvorschriften sollen im Luftverkehr durch nachhaltige Treibstoffe, die weniger CO₂-Emissionen verursachen als fossiles Kerosin, die Klimaziele der EU für 2030 und 2050 erreicht werden. Um diese Ziele zu erreichen müssen bestehende Hemmnisse für nachhaltige Flugkraftstoffe reduziert werden, da die Marktentwicklung insbesondere durch das bisher geringe Angebot und entsprechend hohe Preise verhindert wird (Europäischer Rat, 2023d).

Zu diesem Zweck umfasst die neue Verordnung verschiedene Bestimmungen:

- Anbieter von Flugkraftstoffen werden verpflichtet, sicherzustellen, dass ihre Produkte in der EU ab 2025 einen Mindestanteil an nachhaltigen Flugkraftstoffen und ab 2030 einen Mindestanteil an synthetischen Kraftstoffen enthalten. Beide Mindestquoten werden zudem bis 2050 schrittweise weiter angehoben. Der Anteil nachhaltiger Flugkraftstoffe muss 2025 bei 2 %, 2030 bei 6 % und 2050 bei 70 % liegen. Der Anteil synthetischer Kraftstoffe muss ab 2030 bei 1,2 % liegen und bis 2050 bei 35 %.
- Luftfahrzeugbetreiber müssen sicherstellen, dass die jährliche Menge an Flugkraftstoff, die an einem bestimmten Flughafen in der EU vertankt wird, mindestens 90 % des Jahresbedarfs an Flugkraftstoffen ausmacht. Hierdurch sollen zusätzliche Emissionen durch sogenannte „Tankering“-Praktiken verhindert werden. Diese Emissionen würden infolge des Mehrgewichts von Flugzeugen entstehen, wenn diese zur Umgehung der Regelungen an anderen Orten über das notwendige Maß hinaus betankt würden.
- Förderfähige nachhaltige und synthetische Flugkraftstoffe umfassen zertifizierte Biokraftstoffe, erneuerbare Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs (einschließlich erneuerbarem Wasserstoff) und wiederverwertete kohlenstoffhaltige Flugkraftstoffe, die die Nachhaltigkeits- und Emissionsreduktionskriterien der Erneuerbare-Energien-Richtlinie erfüllen.
- Vorschriften für die von den Mitgliedstaaten für die Durchsetzung der Verordnung zu benennenden Behörden und Vorschriften über Geldbußen.
- Einführung eines EU-Kennzeichnungssystems für die Umweltleistung von Luftfahrzeugbetreibern um fundierte Entscheidungen der Verbraucher*innen für grüneres Fliegen zu fördern.
- Berichtspflichten für Kraftstoffanbieter und Luftfahrzeugbetreiber, die es ermöglichen, die Wirkungen der Verordnung auf die Wettbewerbsfähigkeit von Betreibern und Plattformen in der EU zu überwachen.

Die Verordnung (EU) 2023/2405 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr (Initiative „ReFuelEU Aviation“) gilt grundsätzlich ab dem 1. Januar 2024, einzelne Artikel (4, 5, 6, 8 und 10) ab dem 1. Januar 2025.

ReFuelEU Maritime Initiative

Die Initiative „FuelEU Maritime“ ist ein weiterer Teil des Pakets „Fit für 55“ und verfolgt das Hauptziel, die Nachfrage nach erneuerbaren und kohlenstoffarmen Kraftstoffen und deren konsequente Nutzung im Schifffahrtssektors zu steigern. Hierdurch sollen die Treibhausgasemissionen verringert und gleichzeitig das reibungslose Funktionieren des Seeverkehrs ohne Verzerrungen im EU-Binnenmarkt gewährleistet werden.

Die ReFuelEU Maritime Initiative geht dabei einen ähnlichen Weg wie die ReFuelEU Aviation Initiative und soll den Schwerölverbrauch im Seeverkehr reduzieren und die entsprechende Produktion alternativer Kraftstoffe anregen. Am 25.07.2023 haben die EU-Mitgliedstaaten der Verordnung zugestimmt.

Die neue Verordnung umfasst damit die folgenden wesentlichen Bestimmungen in Bezug auf PtL:

- Maßnahmen, um die Treibhausgasintensität der im Schifffahrtssektor verwendeten Kraftstoffe beginnend mit 2 % im Jahr 2025 um mindestens 80 % im Jahr 2050 zu verringern.
- einen Anreiz zur Einführung erneuerbarer Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs (engl. „renewable fuels of non-biological origin“, kurz „RFNBO“) mit hohem Dekarbonisierungspotenzial.
- den Ausschluss fossiler Brennstoffe vom Zertifizierungsverfahren der Verordnung.
- Einnahmen aus der Durchführung der Verordnung („FuelEU-Strafzahlungen“) sollen möglichst für Projekte zur Förderung der Dekarbonisierung des Seeverkehrs mit einem verbesserten Transparenzmechanismus verwendet werden.

Hierbei wird ein Grenzwert der Treibhausgasintensität der Energie festgelegt, die an Bord eines Schiffes verwendet wird. Laut Vorschlag soll der Wert alle fünf Jahre angepasst werden, so dass der CO₂-Gehalt der verwendeten Energie ab 2025 um 2 %, ab 2030 um 6 %, ab 2035 um 14,5 %, ab 2040 um 31 %, ab 2045 um 62 % und schließlich ab 2050 um 80 % reduziert wird (Europäischer Rat, 2023c). Die Reduktionsziele für die Treibhausgasintensität werden gegenüber der durchschnittlichen Treibhausgasintensität der von Schiffen im Jahr 2020 verbrauchten Energie festgelegt. Synthetische Kraftstoffe werden durch einen besonderen Mechanismus berücksichtigt. Wenn der Anteil von RFNBO bis zum Jahr 2031 im Brennstoffmix nicht über ein Prozent liegt, tritt eine verpflichtende Mindestquote ab 2034 in Höhe von 2 % in Kraft (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2023b).

Die neuen Vorschriften der Verordnung (EU) 2023/1805 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. September 2023 über die Nutzung erneuerbarer und kohlenstoffarmer Kraftstoffe im Seeverkehr und zur Änderung der Richtlinie 2009/16/EG gelten im Wesentlichen ab dem 1. Januar 2025 (mit Ausnahme der Artikel 8 und 9, die ab dem 31. August 2024 gelten) (Europäischer Rat, 2023d).

Reform des EU-Emissionshandels

Ein weiterer Teil des Pakets „Fit für 55“ mit Relevanz für die PtL-Marktentwicklung ist die Reform des EU-Emissionshandelssystems. Das EU-EHS ist einer der größten CO₂-Märkte der Welt und das wichtigste Instrument der EU zur Senkung der Treibhausgasemissionen in dem ein konkreter CO₂-Preis bestimmt wird. Alle Einrichtungen, die unter das EHS fallen, müssen jedes Jahr „Zertifikate“ für ihre Treibhausgasemissionen erwerben. Gleichzeitig wird jedes Jahr eine Obergrenze für die Zertifikate festgelegt, die in dem jeweiligen Jahr auf den Markt gebracht werden dürfen. Da diese Obergrenze von Jahr zu Jahr sinkt bietet dies den Unternehmen finanzielle Anreize zur Senkung ihrer Emissionen. Bestimmte Sektoren, in denen lediglich eine Verlagerung von CO₂-Emissionen in andere Weltregionen droht, erhalten kostenlose Zertifikate, damit sie international wettbewerbsfähig bleiben.

Das bisherige EU-EHS hat rund 40 % der gesamten EU-Emissionen abgedeckt und seit seiner Einführung im Jahr 2005 konnten die EU-Emissionen in den erfassten Sektoren um 41 % reduziert werden. Die Reform soll zu weiteren Emissionssenkungen führen und die EU damit dem Ziel der Klimaneutralität näherbringen.

Das bisherige EU-EHS hat rund 10.000 Unternehmen aus den folgenden Branchen erfasst:

- Strom- und Wärmeerzeugung
- energieintensive Industriesektoren wie z.B. Erdölraffinerien, Stahlindustrie, Zement-, Glas- und Papierproduktion
- gewerblicher Luftverkehr bei Flügen im Europäischen Wirtschaftsraum

Mit der Reform des EHS sollen durch eine schnellere Senkung der Obergrenze eine Emissionsreduktion von 62 % gegenüber dem Stand von 2005 erreicht werden.

Erstmals werden auch Emissionen aus der Schifffahrt in das EU-EHS einbezogen. Die meisten großen Schiffe werden von Anfang an in den Geltungsbereich des EU-EHS fallen. Die Verpflichtung für Schifffahrtsunternehmen zur Abgabe von Zertifikaten wird dabei schrittweise eingeführt: 40 % für geprüfte Emissionen ab 2024, 70 % ab 2025 und 100 % ab 2026. Offshore-Schiffe fallen zunächst noch unter die sogenannte „MRV“-Verordnung (EU) 2015/757 über die Überwachung, Meldung und Prüfung von CO₂-Emissionen aus dem Seeverkehr, sollen aber zu einem späteren Zeitpunkt in das EU-EHS einbezogen werden. Nicht-CO₂-Emissionen (Methan und N₂O) aus der Schifffahrt fallen ab 2024 unter die MRV-Verordnung und ab 2026 unter das EU-EHS.

Zudem wurde ein neues, separates Emissionshandelssystem für Gebäude, den Straßenverkehr und weitere Sektoren (vor allem Kleingewerbe) eingeführt, um kosteneffiziente Emissionssenkungen auch in diesen Sektoren zu gewährleisten, bei denen sich eine Dekarbonisierung bisher als schwierig erwiesen hat. Das neue System wird ab 2027 für Händler gelten, die Brennstoffe für Gebäude, den Straßenverkehr und weitere Sektoren liefern. Falls die Öl- und Gaspreise im Vorfeld der Einführung des neuen Systems außergewöhnlich hoch sind, greift eine Klausel, die eine Verschiebung bis 2028 ermöglicht.

Im Luftfahrtsektor werden die bisher kostenlosen Emissionszertifikate schrittweise abgeschafft und ab 2026 werden die Zertifikate vollständig versteigert. Bis zum 31. Dezember 2030 werden 20 Millionen Zertifikate reserviert, um Anreize für Luftfahrzeugbetreiber zu schaffen, die Verwendung fossiler Brennstoffe zu reduzieren. Das EU-EHS wird dabei für innereuropäische Flüge einschließlich Flüge in das Vereinigte Königreich und die Schweiz gelten, während für außereuropäische Flüge in und aus beteiligten Drittländern von 2022 bis 2027 das internationale CORSIA-Abkommen („Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation“) der UN-Luftfahrtorganisation ICAO gelten wird. Zudem soll die Transparenz in Bezug auf Emissionen von Luftfahrzeugbetreibern und die Kompensation ebenfalls verbessert und ein Rahmen für die Überwachung, Meldung und Prüfung nicht-CO₂-bedingter Auswirkungen der Luftfahrt geschaffen werden. Aufbauend auf den Ergebnissen dieses Rahmens wird die EU-Kommission gegebenenfalls auch weitere Maßnahmen zur Minderung der nicht-CO₂-bedingten Auswirkungen der Luftfahrt vorschlagen.

Im Dezember 2022 erzielten der Rat und das Europäische Parlament eine vorläufige politische Einigung über die EHS-Reform. Der Rat hat die neuen Rechtsvorschriften im April 2023 förmlich angenommen so dass die Richtlinie (EU) 2023/959 ab Anfang 2024 in Kraft tritt (Europäischer Rat, 2023b).

Energiebesteuerungsrichtlinie

Der Green Deal sieht ferner vor, die **Energiebesteuerungsrichtlinie** zu überarbeiten, so dass diese zukünftig möglichst die Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit widerspiegelt. Die vorgeschlagene Überarbeitung betrifft primär zwei Bereiche:

- Die Struktur der Steuersätze, indem die Mindeststeuersätze für Kraftstoffe und elektrischen Strom auf dem tatsächlichen Energiegehalt und der Umweltleistung und nicht auf dem Volumen beruhen sollten.
- Die Erweiterung der Steuerbemessungsgrundlage, indem mehr Produkte einbezogen und einige der noch bestehenden Ausnahmen und Ermäßigungen gestrichen werden.

Ziel ist es, dass fossile Kraftstoffe wie Kohle, Öl, Gas zukünftig entsprechend ihrer umweltschädlichen Wirkung besteuert würden, während die Nutzung nachhaltiger Kraftstoffe (wie PtL) durch Steuerausnahmen gefördert würde. Zudem sollten grundsätzlich auch Flug- und Schiffskraftstoffe in das Besteuerungssystem einbezogen werden (Europäischer Rat, 2024).

Carbon Management Strategie

Da in einigen Sektoren mit schwer vermeidbaren Emissionen auch im Jahr 2040 in begrenztem Umfang noch fossile Brennstoffe verwendet werden, wird seitens der EU das industrielle CO₂-Management als Teil der Lösung zur Zielerreichung (Klimaneutralität) gesehen. Daher wurde im Februar 2024 die Mitteilung „Auf dem Weg zu einem ehrgeizigen industriellen CO₂-Management in der EU“ (COM(2024)62) veröffentlicht. Das Dokument zeigt auf, wie ein politischer Rahmen zur Einführung von Lösungen für das industrielle CO₂-Management (CCU, CCS) gestaltet werden kann. Dabei werden sowohl Strategien für CCU und CCS als auch für eine CO₂-Transportinfrastruktur entwickelt.

3.3 Kurzbewertung des bestehenden Politikrahmens

Bislang ist der in Kapitel 3.1 und 3.2 beschriebene Politikrahmen zur konkreten Förderung von Power-to-Liquid und Brennstoffzellen-Technologien noch sehr begrenzt bzw. im Aufbau begriffen. Durch Forschungsprojekte und Potenzialanalysen wird das Thema jedoch immer relevanter und erhält ein immer stärkeres Gehör auf der politischen Agenda, wie sich in neueren politischen Entwicklungen zeigt. Insbesondere in Bereichen, für die bislang keine Optionen zur Direktelektrifizierung bestehen wie in der Luftfahrt, Schifffahrt oder im Bereich der Spezialmaschinen, sind große Potenziale vorhanden, die gehoben werden sollten.

Auf nationaler Ebene wurde mit der Veröffentlichung der PtL-Roadmap im April 2021 ein klarer Fokus auf synthetische Kraftstoffe im Luftverkehr gelegt. Hierbei wurde das Ziel formuliert, dass bis zum Jahr 2030 der Kerosinabsatzes zu 2 % aus synthetischen Kraftstoffen bestehen soll. Konkret umgesetzt wurde diese Zielvorgabe durch die nationale Umsetzung der REDIII.

Die aktuelle Bundesregierung unterstützt diese Pläne und hat angekündigt, die Ziele für PtL v.a. im Luftverkehr weiter zu steigern. In der Eröffnungsbilanz des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz heißt es, dass „die Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff und grünes synthetisches Kerosin erheblich gesteigert werden [sollen]“ (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022b). Darüber hinaus sind weitere Strategien und Pläne vorhanden, um den Verkehrssektor klimafreundlicher zu gestalten, wie das Bahn-Elektrifizierungsprogramm oder die Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr. Allerdings gibt es keine konkreten Maßnahmen, um einen Markthochlauf abseits von synthetischem Kerosin auch für dessen Koppelprodukte anzureizen. Die Bundesregierung setzt in diesen Bereichen bislang insbesondere auf Förderprogramme, um technische Fortschritte zu erzielen.

Zusammenfassend lässt sich damit sagen, dass zwar die Relevanz von PtL erkannt wurde und auch die Notwendigkeit zum Handeln gesehen wird, sich die Politik allerdings bislang vornehmlich auf Strategiepapiere und Zielformulierungen für Luftfahrt-treibstoffe konzentriert. Hervorzuheben ist die Mindestquote für Kerosin in Höhe von 2 % bis 2030. Zudem wird hierbei häufig auf die EU verwiesen, da ein harmonisiertes europäisches Vorgehen gefordert wird. Auch wenn auf EU-Ebene bislang keine spezifische Strategie zur Förderung bestimmter Power-to-Liquid Lösungen veröffentlicht

wurde, so verfolgt die EU u.a. mit den Initiativen „ReFuelEU Aviation“ und „ReFuelEU Maritime“ das Ziel, den grundsätzlichen Markthochlauf von umweltfreundlichen Kraftstoffen zu fördern. Auch die Bestrebungen etwa im EU-Emissionshandel und bei der Energiebesteuerung können einen starken Einfluss auf die Entwicklung von Power-to-Liquid haben.

Allerdings wird in den begleitenden politischen Diskussionen auch darauf hingewiesen, dass durch die bisherigen Aktivitäten kein ausreichend schneller und umfassender Markthochlauf für synthetische Kraftstoffe zu erreichen ist. Die Quotenlösung wird zwar von vielen Akteuren als zweckmäßiger und wichtiger erster Schritt gesehen, allerdings wird kritisiert, dass die in Deutschland beschlossene und auf EU-Ebene diskutierte Quoten nicht ambitioniert genug ausfallen obwohl grundsätzlich die technischen Optionen zur Verfügung stehen, um einen schnellen Markthochlauf zu erreichen. Sogar große Teile der Luftverkehrsbranche fordern ein höheres Ambitionsniveau, um die Klimaschutzziele zu erreichen. In einer aktuellen Studie wird daher u.a. gefordert, die Beimischquote entsprechend ambitioniert anzupassen, um die erforderliche Menge an Kerosin herzustellen (Verbundvorhaben BEniVER (Hrsg.), 2023).

Weiterhin konzentrieren sich der politische Rahmen und die begleitenden Diskussionen bislang zu stark nur auf den Luftverkehr und begrenzt auf die Schifffahrt. Dabei fehlt ein Blick auf weitere Anwendungsfälle, die ebenfalls große Potenziale haben, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren, wie der Bereich der Spezialmaschinen. Aufgrund der Tatsache, dass bei der Fischer-Tropsch-Synthese nie ausschließlich ein einzelnes Produkt hergestellt wird, sondern stets auch Koppelprodukte entstehen (neben Kerosin entsteht beispielsweise auch Diesel oder Naphtha), eröffnet dies ökologische, ökonomische und soziale Potenziale, um mit der Förderung einer Technologie mehrere Anwendungsbereiche parallel zu adressieren. In der PtL-Roadmap wird dieser Aspekt bereits angerissen, indem erwähnt wird, dass „Koppelprodukte [...] für andere Verkehrsträger eingesetzt werden [können] und auf die THG-Quote angerechnet werden können“. Auch von der Industrie gibt es Stimmen, dass es „der Zulassung und Förderung sämtlicher synthetischer Endprodukte in allen verfügbaren Anwendungen, wie z.B. im gesamten Verkehrsbedarf [...] bedarf“ (Präg, o.J.). Dieser Aspekt sollte jedoch deutlich intensiver weiter diskutiert werden, um einen zielgerichteten Einsatz von PtL in ansonsten nicht oder nur sehr schwer dekarbonisierbaren Anwendungsfällen sicherzustellen.

Weiterführende Aspekte zu den Chancen und Herausforderungen von PtL werden daher auch im folgenden Kapitel kurz skizziert. Diese umfassen unter anderem die Definition von Nachhaltigkeitskriterien und die Zertifizierung, die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff (Produktionsmengen in Deutschland, Importe) und Quellen von CO₂.

4 Herausforderungen und Chancen für die Politik

Wie in Kapitel 3 skizziert, wurden bereits erste politische Strategien und Maßnahmen umgesetzt, um Power-to-Liquid sowie Brennstoffzellen-Technologien zu adressieren. Die Themen sind allerdings noch relativ neu auf der politischen Agenda, so dass die Ausgestaltung eines umfassenden Politikpakets noch aussteht.

Bei der Gestaltung der politischen Rahmenbedingungen steht die Politik vor der Aufgabe, bestehende Chancen zu erkennen sowie Herausforderungen und Risiken einzuschätzen. Aufgrund der großen Relevanz und des Umfangs dieser Thematik wurde im Rahmen des ESyRE-Projektes ein separater Endbericht (AP 3.4 Teil I) zu dieser Thematik verfasst (Götz et al., 2024). Die folgende Ausführung stellt ausgewählte Kernerkenntnisse zu den zentralen politikrelevanten Chancen und Herausforderungen dar.

4.1 Herausforderungen

Technische Dimension: Bei strombasierten Kraftstoffen sind große Mengen an Strom, unter anderem für die Herstellung von Wasserstoff, notwendig. Um tatsächlich einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, muss dieser aus erneuerbaren Energiequellen stammen. Deutschland wird jedoch perspektivisch nicht den Bedarf an erneuerbaren Strom decken können, so dass sich Fragen zu Importen stellen (Merten et al., 2020). Hier bieten sich insbesondere Regionen mit einer hohen Solareinstrahlung und/oder Windaktivität an. Neben der Verfügbarkeit an Strom und grünem Wasserstoff, sind für PtL zudem Quellen für CO₂ erforderlich. Auch hier sind unterschiedliche Optionen denkbar (z.B. Direct Air Capture, CCU). Ferner sind auch noch Fragen zu weiteren benötigten Ressourcen offen, die z.B. für die Hochtemperaturelektrolyseure gebraucht werden (Yttrium, Scandium) (Zelt et al., 2021). Hier spielen somit auch Fragen der Kreislaufwirtschaft und Nutzungskonkurrenzen eine entscheidende Rolle.

Ökologische Dimension: Für die Politik stellt sich die Frage, welchen Beitrag synthetische Kraftstoffe und Brennstoffzellen für den Klimaschutz leisten können. Dieses ist besonders relevant, da der Verkehrssektor weiterhin einen besonders hohen Energieverbrauch aufweist. In Hinblick auf das Verfahren zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen besteht die Herausforderung darin, Strom aus (zusätzlichen) erneuerbaren Energien zu erhalten und somit grünen Wasserstoff zu nutzen. Weiterhin wird in der PtL-Prozesskette CO₂ als weitere Ressource benötigt. Hierfür müssen zunächst geeignete Quellen identifiziert und schließlich Kohlenstoffkreisläufe geschlossen werden (vergleiche (Europäische Kommission, o. J.-b)). Zur ökologischen Dimension gehören auch Fragen zur Wasser- und Flächenverfügbarkeit (Ausbau erneuerbarer Energien) und somit zu potentiellen Nutzungskonkurrenzen wie etwa zur Landwirtschaft. Eine Möglichkeit, diese Herausforderung zu adressieren bieten Nachhaltigkeitsstandards oder Zertifizierungsansätze.

- **Ökonomische Dimension:** Ein Hemmnis, das einer schnellen Herstellung, Inbetriebnahme und Nutzung von PtL-Anlagen aktuell entgegensteht, sind die hohen Anfangsinvestitionen (CAPEX). Bei der Fischer-Tropsch-Synthese ist die Technologie bereits weitgehend ausgereift und im industriellen Maßstab verfügbar. Bei der sich noch in Entwicklung befindlichen SOEC/Co-Elektrolyse, die der Fischer-Tropsch-Synthese vorgeschaltet ist, fallen die Investitionskosten aufgrund der bisher geringen Produktionskapazitäten noch deutlich höher aus. Neben Investitionskosten sind auch die Betriebskosten (OPEX) eine weitere Herausforderung. Hierbei sind insbesondere die Strompreise inklusive der entsprechenden Steuern und Abgaben zu nennen. Ferner sind auch Kosten für CO₂ und Wasser bei der Kalkulation der Betriebskosten zu berücksichtigen. Es wird daher davon ausgegangen, dass Unterstützung seitens der Politik notwendig ist, um die Kosten (insbesondere auch im Vergleich zu konventionellen fossilen Produkten) für den Markthochlauf zu reduzieren.
- **Infrastrukturelle Dimension:** Infrastrukturelle Fragen stellen sich primär bei dem Aufbau von Produktionskapazitäten zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe. Eine Analyse von idealen Standortbedingungen ist notwendig, um Transportwege und Kosten zu reduzieren. Ein Standort in der Nähe eines Industrieparks (z.B. Stahl-, Chemie oder Zementwerke bzw. Raffinerien) kann dabei sinnvoll sein, um Abwärme und anfallendes CO₂ zur Effizienzsteigerung zu nutzen.
- **Gesellschaftliche Dimension:** Zwar wird die Akzeptanz der Bevölkerung von synthetischen Kraftstoffen in Bezug auf die Nutzung grundsätzlich als hoch eingestuft, allerdings kann diese sinken, wenn die Kosten für die Verbraucher deutlich ansteigen. Dies kann etwa der Fall sein, wenn die Kosten, die durch eine verpflichtende Mindestquote beim Kerosin entstehen, deutlich spürbar auf Kunden umgelegt werden. Kritische Stimmen („not in my backyard“) gibt es zudem typischerweise beim Ausbau von neuen Infrastrukturen wie erneuerbaren Energien oder beim Bau von Pipelines (z.B. zum Transport von CO₂).

4.2 Chancen

Technische Dimension: Eine Chance für PtL besteht in der Möglichkeit, dass synthetische Kraftstoffe in Zukunft als längerfristige Speicheroption für erneuerbarem Strom dienen können. Zudem können sie prinzipiell auch energiesystemdienlich rückverstromt werden, insbesondere in Bereichen, die bisher und auch perspektivisch durch (fossil betriebene) Dieselgeneratoren oder vergleichbare Hilfsaggregate versorgt werden müssen. Wird der Power-to-Liquid-Pfad durch Forschungsaktivitäten weiterverfolgt, kann dies durch ein beschleunigtes Erreichen der Marktreife zu einer schnelleren Nachfrage (Market-Pull) für Brennstoffzellen und Elektrolyseure führen. Zudem kann dies auch zu einer stärkeren Entwicklung bei anderen damit verbundenen innovativen Technologien führen (z.B. Weiterentwicklung des Direct-Air-Capture-Verfahrens). Ferner sind Koppelprodukte, die im PtL-Verfahren z.B. neben Kerosin ebenfalls hergestellt werden, eine Chance, auch weitere Bereiche, wie z.B. die Chemieindustrie zu dekarbonisieren.

- **Ökologische Dimension:** Power-to-Liquid-Kraftstoffe und die Nutzung von Brennstoffzellen können in ausgewählten Anwendungsfällen einen wesentlichen Beitrag leisten, um die Klimaziele zu erreichen. Dafür muss der notwendige Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammen. Insbesondere bei speziellen Anwendungsfällen, wie im Luftverkehr, gibt es bislang keine Alternativen, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Auch für weitere Bereiche, wie Spezialmaschinen, können PtL-Kraftstoffe eine sinnvolle Alternative sein, um auf die besonderen Nutzungsbereiche und die typischerweise lange Nutzungsdauer dieser Maschinen zu reagieren. Neben den Potenzialen, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren, kann auch die Luftqualität durch synthetische Kraftstoffe verbessert werden. So fallen etwa die Emissionen von HC, NO_x, PM und CO zum Teil deutlich geringer aus als bei fossilen Kraftstoffen (Bierkandt et al., 2018; LBST, 2016).
- **Ökonomische Dimension:** Mit der weiteren Entwicklung klimafreundlicher Technologien kann der Maschinen- und Anlagenbau in Deutschland profitieren, indem ein Markt für klimafreundliche PtX-Technologien aufgebaut wird. Zudem können Arbeitsplätze entstehen und der Export angekurbelt werden. Die Entwicklung synthetischer Kraftstoffe kann zudem eine positive Wirkung auf die Versorgungssicherheit haben. Speziell im Bereich der Spezialmaschinen kann die Nutzung von PtL-Kraftstoffen im Vergleich zum Austausch oder Umrüstung die wirtschaftlichere bzw. ressourceneffizientere Option darstellen und gleichzeitig die Versorgungssicherheit erhöhen.
- **Infrastrukturelle Dimension:** Bei Power-to-Liquid-Kraftstoffen müssen zwar die Produktionskapazitäten aufgebaut werden und die Rohstoffe (wie Wasserstoff) zur Anlage gebracht werden, jedoch können danach zum Transport und bei der Anwendung bestehende Anlagen und Infrastrukturen weiter genutzt werden. Synthetische Kraftstoffe können dabei weitestgehend als direkter („drop-in“ fähiger) Ersatz für konventionelle Kraftstoffe, wie Diesel oder Kerosin, genutzt werden. Auch Häfen zum Import von synthetischen Kraftstoffen oder Raffinerien müssten nicht oder erst bei höheren Beimischquoten umgerüstet werden.
- **Gesellschaftliche Dimension:** Es ist zu erwarten, dass die gesellschaftliche Akzeptanz bei der direkten Nutzung von PtL eher hoch sein wird. Die PtL-Produkte weisen weitgehend die gleiche Qualität auf wie das auf fossilen Energieträgern basierende Produkt und auch die bestehende Infrastruktur kann größtenteils weiter genutzt werden. Es ist zudem nicht davon auszugehen, dass es zu negativen Arbeitplatzeffekten kommt (Viebahn et al., 2018).

5 Fazit und Empfehlungen an die Politik

Aufgrund der noch immer sehr hohen Emissionen im Verkehrssektor, sind vielfältige Strategien erforderlich, um den Klimaschutz in diesem Bereich noch stärker zu fördern. Eine Option für spezielle Anwendungsfälle ist die Nutzung von strombasierten Kraftstoffen, die im Power-to-Liquid-Verfahren hergestellt werden können. Kommt der Strom, der hierfür erforderlich ist, aus zusätzlich errichteten erneuerbaren Energiequellen, kann ein wesentlicher Beitrag geleistet werden, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Neben den grundsätzlichen Chancen, die die Technologie bietet, sind aktuell noch verschiedene Herausforderungen und Hemmnisse vorhanden, die einer schnellen Anwendung von PtL-Technologien entgegenstehen (siehe Kapitel 4.1). Diese reichen von noch fehlenden Produktionsanlagen, der unzureichenden Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien, hohen Kosten für Hersteller und Nutzer, bis hin zur fehlenden Planungssicherheit für Investoren (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, 2020).

Die Politik steht vor der Aufgabe, diese Chancen und Herausforderungen zu adressieren, um die Treibhausgasemissionen im Verkehr weiter zu reduzieren. Es ist daher erforderlich, Power-to-Liquid für spezielle Anwendungsfälle stärker auf die politische Agenda zu setzen und das Thema zu forcieren. Um weitere technischen Fortschritt zu erzielen, einen Markthochlauf von synthetischen Kraftstoffen zu erreichen und erfolgreiche Geschäftsmodelle zu etablieren, ist ein regulatorischer und ökonomischer Rahmen erforderlich, der mit den Kategorien Nachfragesteigerung („market pull“) und technologiegetriebene Innovation („technology push“) beschrieben werden kann und in Abbildung 5 dargestellt wird. Hierfür muss ein „level playing field“ geschaffen werden, also klare und faire Wettbewerbsbedingungen für alle Marktteilnehmer (International Transport Forum, 2021; Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, 2020; Schmieder & Scheer, 2021).



Abbildung 5: Rahmenbedingungen für die Etablierung von PtL-Geschäftsmodellen

Quelle: eigene Abbildung basierend auf (Bergk et al., 2018)

Um konkrete Geschäftsmodelle für PtL zu entwickeln, müssen zunächst klare Ziele definiert werden und Prioritäten geklärt werden. Für die Hersteller und Investoren von PtL-Technologien ist Planungssicherheit ein wesentlicher Aspekt, um Entscheidungen zu treffen und Investitionen zu tätigen. Dafür muss es seitens der Politik klare Zielvorgaben geben (indem z.B. ein Enddatum für die Nutzung von fossilem Kerosin bzw. Diesel festgelegt wird), die mit entsprechenden politischen Maßnahmen unterstützt werden. Ohne eine umfassende Strategie ist die Gefahr groß, dass weiterhin Lock-in-Effekte in fossilen Technologien entstehen und damit langfristige Investitionsentscheidungen mit einer ungünstigen Klimawirkung getroffen werden.

Mit der Planungssicherheit hängen auch die möglichen Anwendungsfälle und die damit verbundenen Fragen zur Infrastruktur zusammen. Im Flugverkehr und in der Hochsee- und Binnenschifffahrt sind klimafreundliche Alternativen zu PtL derzeit nicht oder nur begrenzt verfügbar (Oeko-Institut, 2019). Daher bilden diese Bereiche bereits einen Schwerpunkt in der bisherigen politischen Diskussion und werden auch von der PtL-Roadmap prioritär betrachtet. Matthes et al. (2021) bezeichnet synthetische Kraftstoffe im Flugverkehr auf Basis einer vergleichenden Szenarioanalyse als „relevanteste[n] Treiber für den Bedarf an synthetischen Kraftstoffen“. Aber auch andere Anwendungen können in Zukunft für PtL relevant sein, wie z.B. der Einsatz in Spezialmaschinen (z.B. Lokomotiven, Triebwagen, Landmaschinen), im Katastrophenschutz oder im Verteidigungssektor. Gerade weil diese energie- und ressourcenintensiven Fahrzeuge bzw. Anlagen typischerweise sehr lange genutzt werden und ein vorzeitiger Austausch oder eine Nachrüstung mit relativ hohen Kosten verbunden ist (Helms & Heidt, 2014), haben synthetische Kraftstoffe das Potenzial, die Treibhausgasemissionen in diesen Bereichen signifikant zu reduzieren. Insbesondere weil bei dem Fischer-Tropsch-Verfahren auch unvermeidliche weitere Koppelprodukte entstehen, sollte somit nicht ausschließlich ein Fokus auf Kerosin gelegt werden, sondern auch weitere Anwendungsfälle für die anfallenden Koppelprodukte geprüft werden (Verbundvorhaben BEniVER (Hrsg.), 2023). Beispiele sind der Einsatz von synthetischem Diesel bei Spezialmaschinen oder die Nutzung flüssiger Energieträger (wie beispielsweise Naphtha) als Feedstock in der Chemieindustrie. Es ist daher notwendig, die bestehenden Strategien zu erweitern und auszubauen und weitere Anwendungsfälle zu prüfen: Wo kann PtL sinnvoll eingesetzt werden? Sind Alternativen vorhanden (wie eine direkte Elektrifizierung)? Wie effizient sind die unterschiedlichen Technologiepfade? Welche Bedingungen müssen zur Herstellung und Nutzung erfüllt werden? Welche Anforderungen werden an die Energieautonomie bzw. Versorgungssicherheit gestellt?

Damit hängt auch die Integration unterschiedlicher Sektoren zusammen und damit die umfassende Betrachtung der einzelnen Bereiche entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Hersteller bis zum Abnehmer und Nutzer (Lakeit et al., 2022). Die Definition von langfristigen Zielen und die Analyse möglicher Anwendungsfälle sollte daher möglichst auf EU-Ebene umgesetzt werden, um europaweit ein einheitliches Vorgehen und gleiche Wettbewerbsbedingungen zu garantieren. Dies könnte z.B. in Form einer umfassenden EU-weiten Power-to-Liquid/e-fuel-Strategie erfolgen.

Da abzusehen ist, dass die Wirtschaftlichkeit synthetischer Kraftstoffe in der Anfangsphase noch nicht mit konventionellen Kraftstoffen mithalten wird (u.a. durch die absehbar hohen Preise für Wasserstoff), ist bis zur Marktdurchdringung der neuen Technologien eine finanzielle Förderung erforderlich.

Neben weiteren Forschungsprojekten (insb. für die SOEC/SOFC) und Förderprogrammen können auch Markteinführungsprogramme die anfänglich hohen Investitionskosten abfedern und das wirtschaftliche Risiko für Hersteller minimieren (aireg et al., 2017). Ein weiteres Instrument, das derzeit im Bezug zu Power-to-Liquid diskutiert wird, sind Mengenausschreibungen, womit von öffentlicher Hand wettbewerbliche Ausschreibungen für bestimmte Kraftstoffmengen durchgeführt werden. Durch die Anzahl und Höhe der Ausschreibungen kann die produzierende Kraftstoffmenge gezielter gesteuert werden. Zudem können auch konkrete Anwendungsfälle bei den Ausschreibungen definiert werden (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, 2020). Darüber hinaus kann die Wirtschaftlichkeit durch eine zielorientierte Regulierung der Strom- und CO₂-Preise adressiert werden wie etwa durch Ermäßigungen bei der Energiesteuer oder einer Anpassung der Maut (International Transport Forum, 2021). Eine weitere Option zur Finanzierung von PtL Fördermaßnahmen stellen auch Einnahmen aus dem nationalen Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) dar, die sich aus dem europäischen Emissionshandel bzw. der CO₂ Bepreisung ableiten (Scheer et al., 2021). Auch eine zusätzliche Gebühr, die die Flugpassagiere für den Einsatz synthetischer Kraftstoffe bezahlen müssten, wird diskutiert (International Transport Forum, 2021; Tagesspiegel Background, 2021; Transport & Environment & Global Alliance Powerfuels, 2021).

Neben Maßnahmen, die die Wirtschaftlichkeit der PtL-Herstellung adressieren, sollten seitens der Politik klare Vorgaben geschaffen werden, um die Zielerreichung sicherzustellen. Wie in diesem Bericht dargelegt, wird derzeit insbesondere die Mengen- und THG-Minderungsquote diskutiert, womit eine sukzessive Steigerung der Nachfrage erreichen werden kann (ifeu, 2021). In Deutschland ist eine Quote für Inverkehrbringer von synthetischem Kerosin bereits beschlossen. Mit den ReFuelAviation und ReFuelEU Maritime Initiativen wird auch auf EU-Ebene eine Quote eingeführt. Allerdings werden die aktuellen Vorschläge von einigen Stellen als noch zu wenig ambitioniert bewertet und zudem fokussieren die Quoten lediglich auf ausgewählte Kraftstoffe wie Kerosin im Flugverkehr. Hier könnte eine Ausweitung auf andere Bereiche die Nachfrage nach PtL-Kraftstoffen bzw. den unvermeidlich anfallenden Koppelprodukten weiter steigern.

Zu einem wirksamen Politikpaket gehört darüber hinaus auch eine robuste Zertifizierung für PtL Produkte. Um tatsächlich einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, müssen transparente Nachhaltigkeitsaspekte möglichst international abgestimmt werden (wie z.B. Herkunftsnachweise für den benötigten Strom für die Elektrolyse, Nachweise über die Quelle des Wassers und des CO₂). Ein harmonisiertes Verfahren zur Zertifizierung ist daher notwendig. In der Praxis gibt es bereits Strategien, Konzepte und Anforderungen, wie am Beispiel Wasserstoff zu sehen (siehe TÜV Süd, das Projekt CertifHy, die freiwillige Initiative des ISCC (dena & Weltenergierat, 2022)). Ferner wird durch die RED die Prüfung von Kriterien für RFNBOs umgesetzt, indem eine Bilanzierung durch Massenbilanzierungssysteme gefordert wird. Dafür soll eine EU-

Datenbank eingerichtet werden, die eine Rückverfolgung flüssiger Kraftstoffe für den Verkehr ermöglichen soll (Artikel 28(2)) (Matthes et al., 2021).

Zudem sollten auch weiterhin Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gefördert werden, insbesondere für die SOEL / SOEC. Da der Bereich viele Facetten hat, sollte auch die Forschungsförderung auf den jeweiligen Fall optimiert sein. Einige Technologien stehen noch am Anfang und brauchen eine umfassende Finanzierung um das schnelle Durchlaufen von Lernkurven sicherzustellen (Hobohm et al., 2018). Andere Technologien haben den Laborstatus bereits verlassen, so dass die Optimierung von Technologiepfaden (Effizienz, Zuverlässigkeit) und Demonstrationsvorhaben zur großtechnischen Erprobung gefördert werden sollten (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, 2020) (vergleiche (BMBF, 2022)). Ferner sollte auch die internationale Dimension des Themas bei der Forschungsförderung erfasst werden, wie die Förderung von Projekten in potenziellen PtL-Exportländern mit umfassenden Nachhaltigkeitskonzepten (Lakeit et al., 2022).

Bei der Gestaltung eines PtL-Politikpakets ist es somit entscheidend, nicht nur die einzelnen Politikinstrumente im Blick zu haben, sondern den kompletten Mix an Instrumenten zu betrachten. Synergien und Wechselwirkungen zwischen den Instrumenten müssen beachtet werden und einzelne Maßnahmen so miteinander abgestimmt werden, dass sie sich in ihrer Wirkung verstärken.

Parallel zu den genannten Instrumenten sind weitere Aktivitäten notwendig, die eine Voraussetzung bilden, um Power-to-Liquid-Technologien zu fördern. Hierzu gehören der weitere Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft, internationale Kooperationen (siehe u.a. Europäische Kommission (o. J.-a)) und Handelsbeziehungen (siehe z.B. Aktivitäten bei H2Global Foundation (o. J.)), der Aufbau einer CO₂-Infrastruktur, eine Wissenschaftskommunikation und Aufklärungsarbeit sowie die weitere Klärung von Akzeptanzfragen.

6 Literaturverzeichnis

- aireg, audi, DVGW, DWV, ontras, performing energy, & uniper. (2017). *Eckpunktepapier für ein Markteinführungsprogramm von Power-to-X Technologien. Vorschlag für ein Innovations- und Förderprogramm mit Fokus auf PtX-Anwendungen im Mobilitätssektor*. <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/energiewende/ptx-allianz-eckpunktepapier.pdf>
- Bergk, F., Fehrenbach, H., Lambrecht, U., Räder, D., Fuchs, L., Schmidt, M., Schwarz, S., & Wolf, P. (2018). *Beitrag strombasierter Kraftstoffe zum Erreichen ambitionierter verkehrlicher Klimaschutzziele in Baden-Württemberg* (S. 44). ifeu, ZSW. https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/181126_Klimaschutz_Kurzugutachten_Strombasierte_Kraftstoffe_ifeu_ZSW.pdf
- Bierkandt, T., Severin, M., Ehrenberger, S., & Köhler, M. (2018). *Klimaneutrale synthetische Kraftstoffe im Verkehr Potenziale und Handlungsempfehlungen*. 41.
- BMBF. (2022, Oktober 21). *Kopernikus Projekte*. Power-to-X in Deutschland: Welche Projekte es heute schon gibt. https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/p2x/ptx_projekte
- BMWi (Hrsg.). (2020). *Nationale Wasserstoffstrategie*. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publication-file&v=20
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr. (2021a). *BMVI startet Markttest für Förderung von Anlagen für strombasierte Kraftstoffe in Raffineriegröße*. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/081-scheuer-markttest-anlagen-strombasierte-kraftstoffe.html>
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr. (2021b). *Erneuerbare Kraftstoffe*. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/Alternative-Kraftstoffe/erneuerbare-kraftstoffe.html>
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr. (2021c). *Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge*. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/clean-vehicles-directive.html>
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr. (2021d). *Mit der Elektrobahn klimaschonend in die Zukunft – Das Bahn-Elektrifizierungsprogramm des Bundes*. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-aktuell/elektrobahn-klimaschonend-zukunft-bahn-elektrifizierungsprogramm.html>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2019). *BUM-Aktionsprogramm PtX „Power-to-X“*. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutzinitiative/iki_aktionsprogramm_ptx_bf.pdf
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2021). *Eröffnung der weltweit ersten E-Kerosin Anlage in Werlte (Emsland)*. <https://www.bmu.de/rede/eroeffnung-der-weltweit-ersten-e-kerosin-anlage-in-werlte-emsland>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2023a). *Markthochlauf für Wasserstoff beschleunigen – Bundeskabinett beschließt Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie (Pressemitteilung)*. <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/markthochlauf-fuer-wasserstoff-beschleunigen-bundeskabinett-beschliesst-fortschreibung-der-nationalen-wasserstoffstrategie>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2023b). *Weg in der EU frei zur Implementierung von nachhaltigen erneuerbaren Kraftstoffen im Seeverkehr*. Pressemitteilung. <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/weg-in-der-eu-frei-zur-implementierung-von-nachhaltigen-erneuerbaren-kraftstoffen-im-seeverkehr>

Bundesministerium für Verkehr, Bau und digitale Infrastruktur. (2013). *Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Energie auf neuen Wegen*. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/mks-strategie-final.pdf?__blob=publicationFile

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2018). *Energie auf neuen Wegen. Aktuelles zur Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung*. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/energie-auf-neuen-wegen.pdf?__blob=publicationFile

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2019). *Erster Bericht über die Umsetzung des nationalen Strategierahmens in Deutschland (AFID-Bericht)*. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/afid-erster-bericht.pdf?__blob=publicationFile

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2022a). *Bundesminister Robert Habeck: „Wasserstoff-Zusammenarbeit mit den Vereinigten Arabischen Emiraten ausbauen“*. Pressemitteilung. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/03/20220321-bundesminister-robert-habeck-wasserstoff-zusammenarbeit-mit-den-vereinigten-arabischen-emiraten-ausbauen.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2022b). *Eröffnungsbilanz Klimaschutz*. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.html

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2023). *Durchbruch für ambitionierten Ausbau erneuerbarer Energien bis 2030: Neue EU-Richtlinie für erneuerbare Energien beschlossen*. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/03/20230330-durchbruch-fur-ambitionierten-ausbau-erneuerbarer-energien-bis-2030.html>

Bundesregierung. (2021). *PtL-Roadmap*. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/ptl-roadmap.pdf?__blob=publicationFile

Bundesregierung. (2022). *Fortschrittsbericht zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie*. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Downloads/fortschrittsbericht-der-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1

California Air Resources Board. (o. J.). *Heavy-Duty Low NOx*. Abgerufen 22. März 2022, von <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/heavy-duty-low-nox/about>

dena, & Weltenergieat. (2022). *Global Harmonisation of Hydrogen Certification. Overview of global regulations and standards for renewable hydrogen*. https://www.weltenergieat.de/wp-content/uploads/2022/01/dena_WEC_Harmonisation-of-Hydrogen-Certification_digital_final.pdf

Deutsche Bahn AG. (2022). *Deutsche Bahn verabschiedet sich vom Diesel*. https://gruen.deutschebahn.com/de/news/dieselausstieg?dbkanal_007=teaserBlock_4-1_link_DieDBverabschiedetsichvomDiesel

Europäische Kommission. (o. J.-a). *Mission Innovation launches a new global coalition to support the clean hydrogen economy*. Abgerufen 28. Juli 2023, von https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/mission-innovation-launches-new-global-coalition-support-clean-hydrogen-economy-2021-06-02_en

Europäische Kommission. (o. J.-b). *Nachhaltige Kohlenstoffkreisläufe*. Abgerufen 28. Juli 2023, von https://climate.ec.europa.eu/eu-action/sustainable-carbon-cycles_de

Europäischer Rat. (2023a). *Energie aus erneuerbaren Quellen: Rat nimmt neue Vorschriften an*. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/10/09/renewable-energy-council-adopts-new-rules/>

Europäischer Rat. (2023b). „Fit für 55“: *Rat verabschiedet wichtige Rechtsakte zur Verwirklichung der Klimaziele für 2030*. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/04/25/fit-for-55-council-adopts-key-pieces-of-legislation-delivering-on-2030-climate-targets/>

Europäischer Rat. (2023c). *Initiative „FuelEU Maritime“: Vorläufige Einigung über die Dekarbonisierung des Seeverkehrs*. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/03/23/fueleu-maritime-initiative-provisional-agreement-to-decarbonise-the-maritime-sector/>

Europäischer Rat. (2023d). *Initiative „ReFuelEU Aviation“: Rat verabschiedet neuen Rechtsakt zur Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors*. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/10/09/refueleu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector/>

Europäischer Rat. (2024). „Fit für 55“: *EU will Energiebesteuerung ändern*. <https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/fit-for-55-energy-taxation/>

Fritsch, M., Puls, T., & Schäfer, T. (2021). *Synthetische Kraftstoffe: Potenziale für Europa. IW-Gutachten*.

Götz, T., Adisorn, T., Tholen, L., & Kaselofsky, J. (2024). *Effiziente Synthese und Rückverstromung von E-Fuels (ESyRE): Chancen und Herausforderungen, Teilbericht 3.1, AP 3.4 [Endbericht]*. Wuppertal Institut.

H2Global Foundation. (o. J.). Abgerufen 28. Juli 2023, von <https://h2-global.de/>

Helms, H., & Heidt, C. (2014). *Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand* (S. 99). ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung.

Hobohm, J., Auf der Maur, A., Dambeck, H., Kemmler, A., Koziel, S., Kreidelmeyer, S., Piegsa, A., Wendring, P., Meyer, B., Apfelbacher, A., Dotzauer, M., & Zech, K. (2018). *Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende*. Eine Studie der Prognos AG, des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT und des Deutschen Biomasseforschungszentrums DBFZ.

ifeu. (2021). *Kriterien für die Herstellung von nachhaltigem PtL für den Flugverkehr Ableitung und Definition von Durchführungskriterien für die Erzeugung oder Beschaffung von nachhaltigem Strom und CO2 als Rohstoff für die PtL-Erzeugung für den Flugverkehr*. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_Bericht_Atmosfair_PtL_Kriterien_2021.pdf

International Transport Forum. (2021). *Decarbonising Air Transport. Acting Now for the Future* (International Transport Forum Policy Papers, No. 94, OECD Publishing).

Lakeit, K., Salomon, H., Reuter, J., Puhmann, T., Crone, K., & Altgelt, F. (2022). *Public Funding for Powerfuels Projects* (S. 7). Global Alliance Powerfuels.

LBST. (2016). *Power-to-Liquids: Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel* (S. 36) [Background]. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/161005_uba_hintergrund_ptl_barrierefrei.pdf

Matthes, F., Braungardt, S., Bürger, V., Göckeler, K., Heinemann, C., Hermann, H., Kasten, P., Mendelewitsch, R., Mottschall, M., & Seebach, D. (2021). *Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland* (V. Cook, Übers.; S. 235). Oeko-Institut. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Die-Wasserstoffstrategie-2-0-fuer-DE.pdf>

Merten, F., Scholz, A., Krüger, C., Heck, S., Girard, Y., Mecke, M., & George, M. (2020). *Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung* (S. 131). Wuppertal Institut, DIW. <https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/LEE-H2-Studie.pdf>

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. (2020). *Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen*. https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/mwide_br_wasserstoff-roadmap-nrw_webbf.pdf

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. (2021a). *Handlungskonzept Synthetische Kraftstoffe Nordrhein-Westfalen*. https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/mwide_br_synthetische_kraftstoffe_bf.pdf

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. (2021b). *Kohlenstoff kann Klimaschutz. Carbon Management Strategie Nordrhein-Westfalen*. https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/mwide_carbon_management_strategie_barrierefrei.pdf

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität. (2020). *Werkstattbericht Alternative Kraftstoffe. Klimawirkung und Wege zum Einsatz alternativer Kraftstoffe. Arbeitsgruppe 1 Klimaschutz im Verkehr*.

Nationaler Wasserstoffrat. (2023). *Stellungnahme zur Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie*. https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2023/2023-07-24-NWR_Stellungnahme_Fortschreibung-der-NWS.pdf

Oeko-Institut. (2019). *Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland*. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/PtX-Hintergrundpapier.pdf>

Präg. (o.J.). „Nur mit E-Fuels im Straßenverkehr wird es E-Kerosin im Flugverkehr geben!“ <https://www.praeg.de/ueber-praeg/aktuelles/nur-mit-e-fuels-im-strassenverkehr-wird-es-e-kerosin-im-flugverkehr-geben>

PtX Lab Lausitz. (o. J.). *PtX Lab Lausitz*. Abgerufen 28. Juli 2023, von <https://ptxlablausitz.de/>

Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr, 5 (2021).

<https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/0Ma1yaNdo2Tp2DOdF1z/content/0Ma1yaNdo2Tp2DOdF1z/BAanz%20AT%2017.02.2021%20B5.pdf?inline>

Scheer, D., Nabitz, L., & Narasinghe, N. (2021). *reFuels im Stakeholder-Diskurs: Eine Positions-analyse von Verbänden aus Wirtschaft, Umwelt und Zivilgesellschaft*. 29.

Schmieder, L., & Scheer, D. (2021). *Regenerative Kraftstoffe im System betrachtet. Zur Rolle von reFuels in Energiesystemanalysen*. Karlsruher Institut für Technologie.

Statista. (2024). *Elektrifizierungsgrad des Eisenbahnnetzes der Deutschen Bahn AG von 1990 bis 2023 und Ziele der Bundesregierung bis 2030*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1391048/umfrage/elektrifizierungsgrad-des-eisenbahnnetzes-der-deutschen-bahn-ag/>

Tagesspiegel Background. (2021). „Fit for 55“: *Intensive Verhandlungen um Luftfahrt*. <https://background.tagesspiegel.de/mobilitaet/fit-for-55-intensive-verhandlungen-um-luftverkehr>

Transport & Environment, & Global Alliance Powerfuels. (2021). *Now is the time for an ambitious European e-kerosene target*. https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/08/2021_06_Letter_accelerate_e-kerosene_final.pdf

Verbundvorhaben BEniVER (Hrsg.). (2023). *Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr. Kurzbericht zur „Roadmap für strombasierte Kraftstoffe“*. https://www.energiesystem-forschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/FF2D7B2342C93593E0537E695E8623C8/current/document/beniver-roadmap_kurzbericht_final-1.pdf

Viebahn, P., Zelt, O., Fishedick, M., Wietschel, M., Hirzel, S., & Horst, J. (2018). *Technologien für die Energiewende. Technologiebericht – Band 2*. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7083/file/WR13-2.pdf>

Wilms, S., Lerm, V., Schäfer-Stradowsky, S., & Sandén, J. (2018). *Heutige Einsatzgebiete für Power. Factsheet zur Anwendung von klimafreundlich erzeugten synthetischen Energieträgern*. dena. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/181123_dena_PtX-Factsheets.pdf

ZDF heute. (2022, März 6). *Lindner: 200 Milliarden Euro für die Klimawende*. <https://www.zdf.de/nachrichten/politik/lindner-sondervermoegen-klimawende-100.html>

Zelt, O., Scholz, A., & Viebahn, P. (2021). *Auswahl der zu bewertenden synthetischen Kraftstoffe und ihrer Bereitstellungstechnologien* (S. 22). https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/MENA-Fuels_Teilbericht3_D2-1_Technologiebewertung.pdf