



E-Fuels zwischen Wunsch und Wirklichkeit

Was strombasierte synthetische Kraftstoffe für die Energiewende im Verkehr leisten können – und was nicht

DISKUSSIONSPAPIER



Impressum

E-Fuels zwischen Wunsch und Wirklichkeit

Was strombasierte synthetische Kraftstoffe für die Energiewende im Verkehr leisten können – und was nicht

DISKUSSIONSPAPIER

ERSTELLT VON

Agora Verkehrswende

Agora Transport Transformation gGmbH
Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-verkehrswende.de
info@agora-verkehrswende.de

DURCHFÜHRUNG

Projektleitung & Autoren

Dr. Ulf Neuling
ulf.neuling@agora-verkehrswende.de
Leon Berks
leon.berks@agora-verkehrswende.de

Satz: Agora Verkehrswende

Lektorat: Infotext

Titelbild: Zeynep Boğaçlu/iStock

Bitte zitieren als:

Agora Verkehrswende (2023): *E-Fuels zwischen Wunsch und Wirklichkeit. Was strombasierte synthetische Kraftstoffe für die Energiewende im Verkehr leisten können – und was nicht.*

Veröffentlichung: August 2023
103-2023-DE

www.agora-verkehrswende.de

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

die öffentliche Debatte im Frühjahr 2023 über die zukünftigen EU-Grenzwerte für neu zugelassene Pkw hat viel Aufmerksamkeit für das Thema E-Fuels geschaffen und gleichzeitig viel Verwirrung und Verunsicherung ausgelöst. Die Europäische Union hatte sich in monatelangen kontroversen Verhandlungen über die Weiterentwicklung der Pkw-Flottengrenzwerte darauf geeinigt, ab 2035 nur noch emissionsfreie Neufahrzeuge ohne Verbrennungsmotor zuzulassen. Trotzdem stellte die Bundesregierung im letzten Moment die Einigung infrage und bestand auf einer Sonderregelung für neue Verbrennerfahrzeuge, die sich ausschließlich mit klimaneutralen synthetischen Kraftstoffen betanken lassen. Dass die EU-Regulierung allein Neufahrzeuge betrifft, ging dabei oft unter und es kamen Ängste auf, dass mit dem „Verbrenner-Ausstieg“ bereits zugelassene Verbrenner-Pkw bald nicht mehr gefahren werden dürften. E-Fuels hingegen weckten die Hoffnung, dass Autofahren mit einem neuen Kraftstoff klimaneutral werden könne und sich sonst nicht viel ändern müsse. Spätestens seit diesem Moment sind E-Fuels in aller Munde.

Auch auf nationaler Ebene konnte zuletzt der Eindruck entstehen, als würden andere Klimaschutzmaßnahmen im Verkehr weniger wichtig, da die Ziele mit E-Fuels einfacher und günstiger zu erreichen seien. Der Koalitionsausschuss von SPD, Grünen und FDP einigte sich Ende März unter anderem auf eine verstärkte Nutzung von synthetischen Kraftstoffen, insbesondere im Straßenverkehr. Die Bundesregierung will demnach einen E-Fuels-Dialog starten, eine E-Fuels-Strategie erarbeiten, Forschung und Entwicklung stärker fördern und 100-prozentige E-Fuel-Kraftstoffe auch für den Straßenverkehr zulassen. Nicht einigen konnte sich die Koalition hingegen auf andere Instrumente wie etwa eine Reform der klimaschädlichen Steuern, Abgaben und Subventionen im Straßenverkehr, eine Offensive zum Ausbau des öffentlichen Verkehrs oder eine Neubewertung von Straßen- und Schieneninfrastrukturprojekten nach Klimaschutzkriterien.

Wie berechtigt sind die Hoffnungen auf E-Fuels als Lösung für den Klimaschutz im Straßenverkehr? Welchen Beitrag können sie für die Energiewende im Verkehr leisten – und welchen nicht? Immerhin geht es beim Klimaschutz um die Lebensgrundlagen der

Bevölkerung und um die vom Grundgesetz garantierten Freiheitsrechte. Deutschland will bis 2045 klimaneutral sein, in allen Sektoren. Die Pflicht, Treibhausgasemissionen zu reduzieren, darf laut Bundesverfassungsgericht nicht weiter auf spätere Generationen verschoben werden. Jeder Beitrag zählt, aber unabhängig davon, wie groß er ist: Er muss in den kommenden zwei Dekaden wirken und deshalb bereits jetzt mit einem sehr robusten Umsetzungsplan unterlegt sein.

Mit dem vorliegenden Diskussionspapier fassen wir den Stand der Wissenschaft zum Potenzial von E-Fuels zusammen. In Fachkreisen wird seit einigen Jahren intensiv diskutiert, wie weit sich fossile Kraftstoffe durch erneuerbar erzeugte synthetische Kraftstoffe ersetzen lassen. Die Forschung konzentriert sich dabei vor allem auf die Anwendungen, für die es bisher keine batterieelektrische Alternative gibt: also in erster Linie auf den Luft- und Seeverkehr. Denn E-Fuels bleiben auf absehbare Zeit ein kostspieliges und rares Gut; und für Pkw ist die Elektromobilität deutlich energieeffizienter, preiswerter und bereits breit verfügbar. E-Fuels können eine Ergänzung zur direkten Nutzung von erneuerbarem Strom sein, aber keine gleichwertige Alternative.

Mit dem Papier zielen wir darauf ab, die aktuellen Diskussionen sachlich und wissenschaftlich fundiert zu unterfüttern. Deutschland braucht erneuerbar erzeugten Wasserstoff und darauf basierende E-Fuels für die Energiewende – in der Industrie, der Energiewirtschaft und im Verkehr. Die politischen Entscheidungen für den Aufbau einer weltweiten Produktion müssen jetzt getroffen werden und sollten auf einer Strategie mit klaren Prioritäten aufbauen, auch mit Blick auf die internationalen Zusammenhänge. Dafür ist es wichtig, zwischen Wunsch und Wirklichkeit unterscheiden zu können, insbesondere im Verkehrssektor.

Wir wünschen eine anregende Lektüre und freuen uns auf den weiteren Dialog.

Dr. Wiebke Zimmer

Stellvertretende Direktorin
für das Team von Agora Verkehrswende
Berlin, 4. August 2023

Ergebnisse und Empfehlungen

1

E-Fuels sind auf absehbare Zeit unverzichtbar, um den Klimaschutz im Luft- und Seeverkehr sowie in Teilen der chemischen Industrie voranzubringen. Gleichzeitig bleiben sie wenig energieeffizient, teuer und aller Voraussicht nach in den nächsten Jahrzehnten nur sehr begrenzt verfügbar. Deshalb müssen sie zielgerichtet produziert und genutzt werden. E-Fuels, die im Straßenverkehr zum Einsatz kommen, obwohl dort batterieelektrische Alternativen vorhanden sind, fehlen in den Sektoren, wo keine solchen Alternativen zur Verfügung stehen.

2

Die Politik konzentriert sich darauf, den zielgerichteten Markthochlauf von E-Fuels durch einen geeigneten politischen und regulatorischen Rahmen zu ermöglichen und durch Förderung von Forschung und Entwicklung zu flankieren. Die EU ist bereits dabei, den regulatorischen Rahmen für E-Fuels in Flug- und Schiffskraftstoffen festzulegen und damit Planungssicherheit zumindest für den europäischen Markt zu schaffen. Bei Forschung und Entwicklung geht es vor allem darum, E-Fuel-Produktionsverfahren mit Fokus auf den Luft- und Seeverkehr zu optimieren sowie nachhaltige CO₂-Quellen zu erschließen, insbesondere durch die Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre. Zusätzliche Förderprogramme für E-Fuels im Straßenverkehr, auf die sich die Bundesregierung mit dem Klimaschutzprogramm 2023 geeinigt hat, bergen die Gefahr, die Entwicklung von E-Fuels für den Luft- und Seeverkehr zu schwächen.

3

Wenn der politische Rahmen steht, haben es Industrie und Finanzwirtschaft in der Hand, das Angebot von E-Fuels für die unverzichtbaren Anwendungen so rasch wie möglich auszubauen. Die bis 2030 weltweit zu erwartenden Produktionskapazitäten für E-Kerosin entsprechen rund drei Prozent des deutschen Kerosinbedarfs; die Produktionskapazitäten für E-Methanol reichen 2030 voraussichtlich für maximal knapp drei Prozent des europäischen Verbrauchs von Schiffskraftstoffen. Diese Planungen gilt es jetzt sicher zu realisieren. Für die folgenden Jahre sind darüber hinaus weitere Projekte in großem Umfang vorzubereiten, um damit den Hochlauf spürbar zu beschleunigen.

4

Investitionen in den Aufbau einer weltweiten E-Fuel-Produktion für den Straßenverkehr bergen kaum absehbare Risiken, sich nicht auszuzahlen und rasch an Wert zu verlieren (*stranded investments*).

Der Bau von Anlagen zur Herstellung von E-Fuels speziell für den Einsatz im Straßenverkehr hat deshalb keine Perspektive in einem über alle Sektoren hinweg konsistenten, kohärenten und ökonomisch effizienten Gesamtkonzept für Klimaneutralität. Die Bundesregierung setzt daher auch in Zukunft darauf, den Energiebedarf durch den effizienten Einsatz von Strom aus erneuerbaren Quellen so gering wie möglich zu halten. Auch eine höhere Auslastung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen in Gunstregionen ändert nichts an der deutlich geringeren Energieeffizienz von Verbrennungsmotoren im Vergleich zum batterieelektrischen Antrieb.

5

Um die weltweite Produktion und Nutzung von E-Fuels sozial und ökologisch gerecht zu gestalten, sind umfassende Nachhaltigkeitskriterien erforderlich. Im Rahmen internationaler Kooperationen müssen darauf aufbauende Standards, Normen und Zertifizierungssysteme implementiert werden, die folgenden Prinzipien folgen: 1. Die Bereitstellung von erneuerbarem Strom für die Wirtschaft und die Bevölkerung der Gunstregionen hat Priorität vor der Erzeugung von E-Fuels für den Export. 2. E-Fuel-Projekte sind ausschließlich mit zusätzlichen Erzeugungsanlagen für erneuerbaren Strom verbunden und bieten auch einen Mehrwert für die Eigenversorgung in den Gunstregionen, etwa durch Stromlieferungen und Ausbau des Stromnetzes. 3. Der erneuerbare Strom wird auch in den Gunstregionen so effizient wie möglich eingesetzt. Direktelektrische Anwendungen haben deshalb auch hier Vorrang vor E-Fuel-Anwendungen.

Inhalt

Vorwort	3
Ergebnisse und Empfehlungen	4
01 Einleitung: Kraftstoffe und Klimaneutralität	7
02 Was sind E-Fuels und wie werden sie hergestellt?	10
2.1. Bereitstellung der Ausgangsstoffe	11
2.2. Kraftstoffsynthese	12
03 Energieeffizienz: Viel Aufwand, wenig Ertrag	15
04 Nachhaltigkeit: Vielschichtig und unabdingbar	17
05 Kosten: Auf absehbare Zeit sehr hoch	20
06 Verfügbarkeit: Nennenswerte Mengen in weiter Ferne	23
6.1 E-Kerosin für die Luftfahrt	24
6.2 E-Methanol für die Schifffahrt	29
07 Importe: Flächenbedarf auch in Gunstregionen enorm	31
08 Fazit: Energieeffizienz bleibt oberstes Gebot	33
09 Literaturverzeichnis	35
10 Anhang	43

Abkürzungsverzeichnis

AEL	Alkalische Elektrolyse
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BtL	Biomass-to-Liquid
CAPEX	Investitionsausgaben, Englisch: capital expenditure
CNG	Komprimiertes Erdgas, Englisch: compressed natural gas
CtL	Coal-to-Liquid
DAC	Direct Air Capture
DACCS	Direct Air Capture with Carbon Storage
DACCU	Direct Air Capture with Carbon Usage
GT	Bruttoraumzahl, Englisch: gross tonnage
GtL	Gas-to-Liquid
HVO	Hydrierte Pflanzenöle, Englisch: hydrotreated vegetable oils
IRA	Inflation Reduction Act
LNG	Verflüssigtes Erdgas, Englisch: liquified natural gas
MtG	Methanol-to-Gasoline
MtJ	Methanol-to-Jet
OPEX	Betriebskosten, Englisch: operational expenditure
PEMEL	Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquids
PtX	Power-to-X
RED	Erneuerbare Energien Richtlinie, Englisch: Renewable Energy Directive
RFNBO	Flüssige oder gasförmige erneuerbare Kraftstoffe für den Verkehr nicht biogenen Ursprungs, Englisch: Renewable fuels of non-biological origin
RWGS	Reverse Wassergas-Shift
SAF	Nachhaltige Flugkraftstoffe, Englisch: sustainable aviation fuels
SOEL	Festoxid-Elektrolyse, Englisch: solid oxide electrolysis
THG-Quote	Treibhausgasminderungsquote
UCO	Altspeiseöl, Englisch: used cooking oil
WtL	Waste-to-Liquid

1 | Einleitung: Kraftstoffe und Klimaneutralität

Die jüngsten politischen Debatten über den Einsatz von strombasierten synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels) im Verkehrssektor haben Fragen in einer breiten Öffentlichkeit aufgeworfen, die in Wissenschaft und Wirtschaft schon länger diskutiert werden. Dabei entstand auch der Eindruck, als könnten E-Fuels im Straßenverkehr eine nennenswerte Rolle spielen – zum Beispiel im März 2023, als die Bundesregierung den über Monate ausgehandelten EU-Kompromiss zur Absenkung der CO₂-Flottengrenzwerte für Pkw im letzten Moment blockierte und auf eine Ausnahmeregelung ab 2035 für E-Fuels in Neufahrzeugen bestand. Allerdings halten selbst die meisten deutschen Automobilhersteller E-Fuels nicht für eine nennenswerte Option für Neufahrzeuge, sondern sehen sie höchstens als Nischenanwendung.¹ Umso wichtiger ist es, einen wissenschaftlich basierten Überblick darüber zu geben, was E-Fuels im Verkehr leisten können – und was nicht.

Zum Hintergrund: Heute steht der Verkehr für etwa 20 Prozent der Treibhausgasemissionen und rund 30 Prozent des Endenergieverbrauchs in Deutschland. Über 90 Prozent der Energie, die im Verkehr verwendet wird, basiert auf Erdöl. Davon entfallen wiederum über 80 Prozent auf den Straßenverkehr. Das deutsche Klimaschutzgesetz schreibt vor, dass der Verkehrssektor bis 2030 seine Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 48 Prozent senkt und 2045 Klimaneutralität erreicht. Allerdings wurden die verbindlich vorgeschriebenen jährlichen Minderungsziele 2021 um zwei Millionen Tonnen und 2022 um neun Millionen Tonnen überschritten. Die Bundesregierung steht nach dem Beschluss des Bundesverfassungsgerichts zum Klimaschutzgesetz und dem bislang geltenden Klimaschutzgesetz in der Pflicht, rasch ein überzeugendes Gesamtkonzept für den Weg zur Klimaneutralität des Verkehrs vorzulegen. Auch die Zusagen Deutschlands zu europäischen und internationalen Klimaschutzvereinbarungen machen ein solchen Schritt zwingend erforderlich.

Dieses Gesamtkonzept für die Verkehrswende sollte einerseits die Mobilitäts- und die Logistikwende adressieren. Die Mobilitäts- und die Logistikwende sorgen dafür, dass der Energieverbrauch des Verkehrs bei gleichbleibender Verkehrsleistung deutlich sinkt. Dies gelingt sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr

beispielsweise mit einer Verlagerung von Straßenverkehr auf die Schiene. Dadurch ließen sich im Hinblick auf einen klimaneutralen Verkehr 2045 bereits über 25 Prozent der Treibhausgasemissionen reduzieren.² Andererseits sollte der Plan die Energiewende im Verkehr beinhalten, um den verbleibenden Energiebedarf mit klimaneutraler Antriebsenergie zu decken und die Emissionen so auf null zu senken.

Dabei zeichnen sich die unterschiedlichen Verkehrsträger wie Straßenverkehr, Luftverkehr und Seeschifffahrt durch teils sehr unterschiedliche Anforderungen an die benötigte Antriebsenergie aus. Daraus ergeben sich verschiedene Optionen für eine erfolgreiche Energiewende mit dem Ziel einer Minderung der Treibhausgasemissionen im Verkehr.

Die Reduzierung der Emissionen insbesondere im Luftverkehr, aber auch im Seeschiffsverkehr ist unter anderem wegen der hohen benötigten Antriebsleistung und des eingeschränkten Platzes besonders herausfordernd. Man spricht hier von sogenannten *Hard-to-abate*-Sektoren, also Sektoren, in denen sich die Dekarbonisierung besonders schwierig gestaltet. Daher wird der Einsatz von (nahezu) CO₂-neutralen Flüssigkraftstoffen im Luft- und Seeverkehr – neben der Verkehrsverlagerung zum Beispiel auf die Schiene – zumindest auf absehbare Zeit die einzige Option zur Defossilisierung sein.³

Grundsätzlich können flüssige fossile Kraftstoffe unter anderem durch E-Fuels oder Biokraftstoffe ersetzt werden. Biokraftstoffe sind potenziell durch deutlich geringere Treibhausgasemissionen als ihr fossiles Pendant gekennzeichnet und können somit zur Reduktion der Klimawirkung des Verkehrssektors beitragen.⁴ Allerdings ist Biokraftstoffen – und dabei insbesondere den konventionellen Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse –

1 24Auto (2023); Merkur.de (2023), Motor1.com (2023).

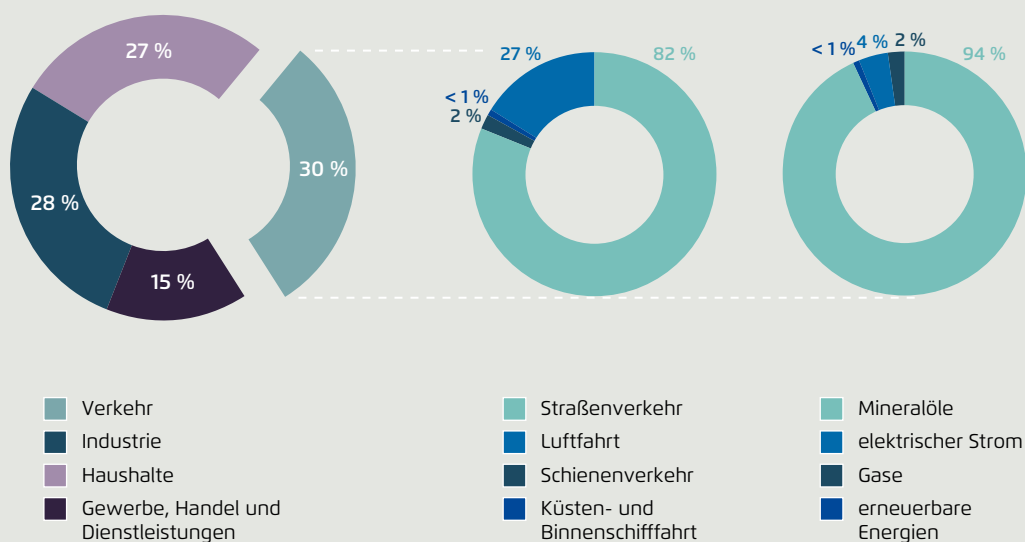
2 Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut (2021).

3 Die tatsächliche Klimawirkung des Luftverkehrs ist deutlich größer, da neben den direkten CO₂-Emissionen durch die Kraftstoff-Verbrennung auch weitere, sogenannte nicht-CO₂-Effekte wie die Kondensstreifen-Bildung und sich daraus formierende Zirruswolken auftreten. Diese Effekte sind für etwa zwei Drittel der gesamten Klimawirkung des Luftverkehrs verantwortlich und bleiben – zumindest teilweise – auch beim Einsatz von E-Kerosin bestehen. Lee et al. (2021).

4 IRENA (2022).

Endenergieverbrauch nach Sektor, Verkehrsträger und Energieträger im Jahr 2019

Abbildung 1



Agora Verkehrswende (2023) | Quelle: AG Energiebilanzen e. V. (2021)

unter anderem ein hoher Wasser- und Flächenbedarf immanent, sie stehen damit in einer möglichen Konkurrenz zum Nahrungsmittelanbau. Sie können also höchstens eine zeitlich begrenzte Übergangslösung darstellen (siehe Infobox: Biokraftstoffe).

Im Gegensatz hierzu ist Strom aus erneuerbaren Energien der mit Abstand wichtigste klimaneutrale Energieform. Und das gilt nicht nur für den Verkehr. Da Strom aus erneuerbaren Energien – auch global betrachtet – auf absehbare Zeit ein knappes Gut bleiben wird, sollte er möglichst direkt verwendet werden: mit Batterien oder Oberleitungen. Jeder Umwandlungsschritt von Strom über Wasserstoff zu E-Fuels erhöht den Energiebedarf deutlich. Dennoch gibt es Anwendungen im Verkehr, die auf Wasserstoff und E-Fuels angewiesen sind.

Insbesondere um diese unverzichtbaren Anwendungen für strombasierte synthetische Kraftstoffe im Verkehr sowie um die Aspekte Herstellungsverfahren, Energieeffizienz, Nachhaltigkeitskriterien, Kosten und der absehbaren Verfügbarkeit geht es in den folgenden Kapiteln.

Biokraftstoffe

Aktuell werden im Verkehrssektor unterschiedliche Biokraftstoffe eingesetzt. Das sind im Wesentlichen konventionelle Biokraftstoffe⁵ wie Biodiesel (primär als Beimischung zu fossilem Diesel, B7) beziehungsweise Bioethanol (als Beimischung zu fossilem Benzin, E10).

Darüber hinaus wurde in den vergangenen Jahren vermehrt HVO (hydrierte Pflanzenöle, Englisch: *hydrotreated vegetable oils*) eingesetzt, unter anderem bei der Deutschen Bahn zur Substitution von fossilem Diesel.⁶ Zusätzlich wurden geringe Mengen Biomethan als CNG (komprimiertes Erdgas,

5 Der Begriff „konventionell“ bezieht sich auf die hier eingesetzte Biomasse, nämlich Energiepflanzen beziehungsweise Pflanzen, die auch als Nahrungs- und Futtermittel eingesetzt werden können.

6 Solarserver (2023).

Englisch: *compressed natural gas*) oder LNG (verflüssigtes Erdgas, Englisch: *liquefied natural gas*) eingesetzt.

Von diesen Biokraftstoffen fallen insbesondere Biodiesel und Bioethanol zu einem großen Teil in die Kategorie konventionelle Biokraftstoffe, da sie überwiegend aus sogenannten Energiepflanzen beziehungsweise Anbaubiomasse (zum Beispiel Raps, Getreide, Zuckerrüben) hergestellt werden. Damit stehen sie potenziell in direkter Konkurrenz zum Nahrungs- und Futtermittelanbau. HVO und Biomethan werden dahingegen überwiegend aus Rest- und Abfallstoffen (zum Beispiel Altspeiseöl, Englisch: *used cooking oil (UCO)*, oder Gülle) hergestellt.

Aufgrund möglicher Flächenkonkurrenz beim Anbau von Biomasse zum Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln stellen konventionelle Biokraftstoffe nach allgemeiner Einschätzung nur eine begrenzt sinnvolle Option dar, um die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zu reduzieren.⁷

Sogenannte fortschrittliche Biokraftstoffe, die aus Rest- und Abfallstoffen wie Gülle, Stroh, Abfall- und Restholz und ähnlichen Rohstoffen produziert werden, sind eine biogene Alternative.⁸ Da diese Rohstoffe zumindest zu einem gewissen Grad zwangsläufig anfallen, ist ihr Einsatz mit keiner zusätzlichen Klimawirkung verbunden und die Kraftstoffe werden mit entsprechend geringen Treibhausgasemissionen verbunden. Allerdings ist die Bereitstellung dieser üblicherweise dezentral anfallenden Rohstoffe sehr aufwendig und ihre Umwandlung in Kraftstoffe häufig technisch komplex und äußerst energieintensiv.

Darüber hinaus ist das Mengenpotenzial von Biomasse aus Abfällen und Reststoffen, bei denen die Flächenkonkurrenzen nicht auftreten, viel zu gering, um in ausreichender Menge Kraftstoff für den Verkehr liefern zu können.⁹

⁷ ifeu (2022); DBFZ (2019).

⁸ Die zur Produktion fortschrittlicher Biokraftstoffe zulässigen Rohstoffe sind in der Erneuerbare Energien Richtlinie der EU unter Anhang IX, Teil A definiert.

⁹ icct (2018); ifeu (2020); NRW.Energy4Climate (2023).

2 | Was sind E-Fuels und wie werden sie hergestellt?

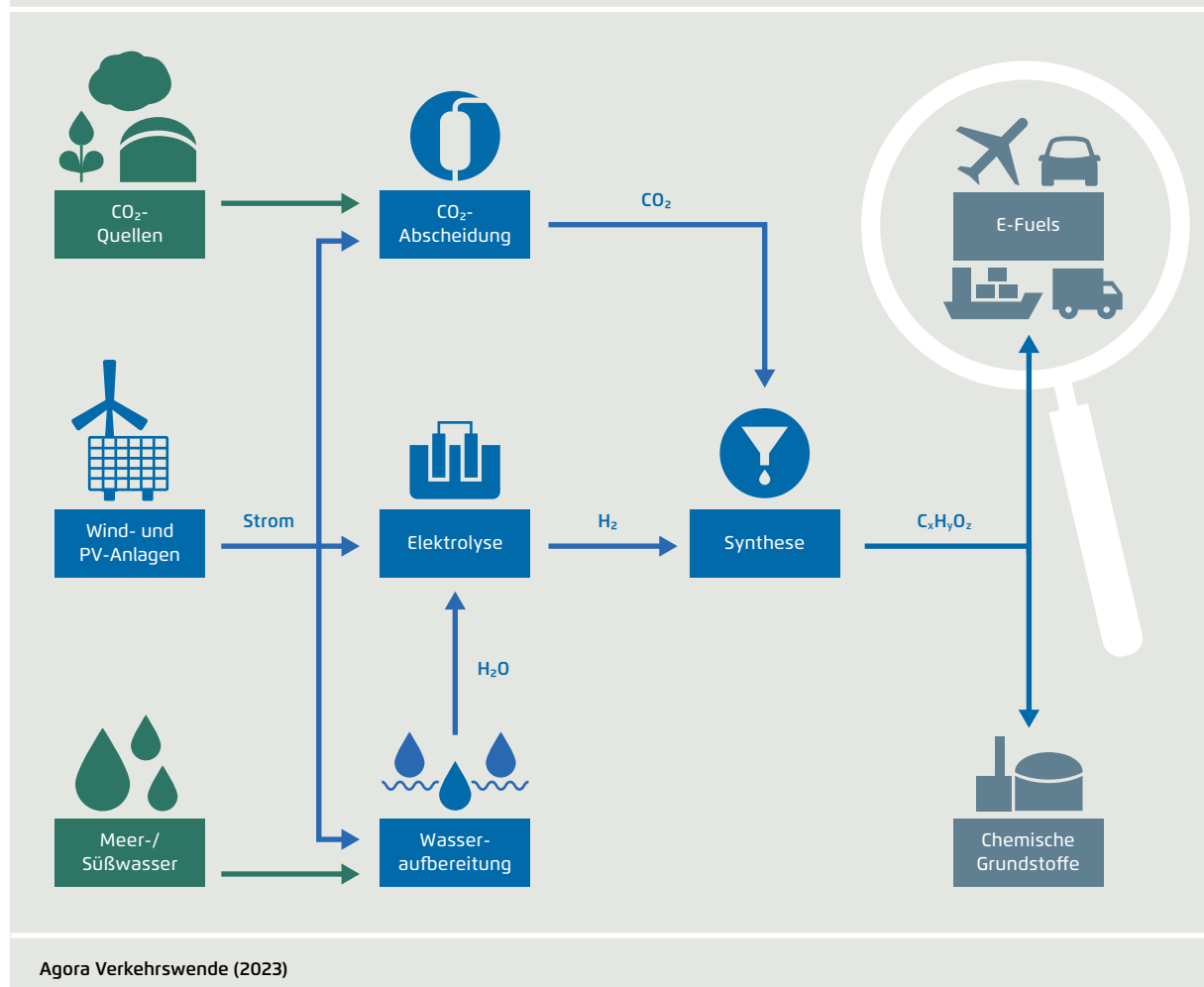
E-Fuels ist ein Sammelbegriff für Kraftstoffe, die aus grünem Wasserstoff und CO_2 hergestellt werden. Dabei steht das „E“ für den elektrischen Strom, der zur Produktion des Wasserstoffs eingesetzt wird. Auf europäischer Ebene werden sie – zusammen mit grünem Wasserstoff – auch als RFNBOs, also „flüssige oder gasförmige erneuerbare Kraftstoffe für den Verkehr nicht biogenen Ursprungs“ (aus dem Englischen: *renewable fuels of non-biological origin*) bezeichnet. Die verfahrenstechnischen Prozesse zur Herstellung von E-Fuels werden allgemein als *Power-to-X*-Prozesse (PtX) bezeichnet. Dabei steht das „X“ für das jeweilige Zielprodukt: Sollen gasförmige Kraftstoffe wie synthetisches Methan produziert werden, spricht man von *Power-to-Gas* (PtG), ist das Ziel die Herstellung von flüssigen Kraftstoffen wie

Kerosin von *Power-to-Liquid* (PtL-)Prozessen. Teilweise werden E-Fuels deshalb auch als PtX-, PtG- oder PtL-Kraftstoffe bezeichnet.

Zur Herstellung werden chemische Syntheseverfahren eingesetzt, weshalb E-Fuels häufig auch als synthetische Kraftstoffe bezeichnet werden. Dabei werden E-Fuels irreführenderweise oftmals mit synthetischen Kraftstoffen gleichgesetzt. Zwar werden sie über entsprechende Syntheseprozesse hergestellt, das hierfür benötigte Synthesegas kann aber auch aus anderen Quellen (zum Beispiel Kohle- oder Biomassevergasung beziehungsweise Erd- oder Biogasreformierung) erzeugt werden. E-Fuels sind also immer synthetische Kraftstoffe, synthetische Kraftstoffe hingegen aber nicht immer E-Fuels.

Schematische Darstellung der E-Fuel-Produktion sowie möglicher Einsatzgebiete

Abbildung 2



Wird der für diese Synthese benötigte Wasserstoff per Elektrolyse mit erneuerbarem Strom hergestellt (sogenannter grüner Wasserstoff) und das ebenfalls benötigte CO₂ aus der Atmosphäre entnommen,¹⁰ sind diese Kraftstoffe nahezu CO₂-neutral. Dies ist nicht der Fall, wenn das CO₂ aus Industrieprozessen wie der Zementherstellung abgeschieden wird (sogenannte Punktquellen). Es handelt sich hier um eine Kaskadennutzung des fossilen CO₂ aus den ursprünglichen Prozessen. Die so produzierten E-Fuels würden zwar fossile Kraftstoffe ersetzen, aber trotzdem weiterhin zusätzliches CO₂ emittieren. Somit stellen sie langfristig keine sinnvollen – sprich nachhaltigen – CO₂-Quellen für eine klimaneutrale Welt dar.

Aufgrund schwer zu vermeidender Restemissionen, die zum Beispiel beim Bau der benötigten Windkraft- und Photovoltaikanlagen oder Raffinerien entstehen, sind E-Fuels zwar nicht – wie häufig angenommen – klimaneutral, haben aber nur eine sehr geringe Klimawirkung. Da die meisten E-Fuels weiterhin auf Kohlenstoff (aufgrund des eingesetzten CO₂) basieren, können sie nicht zur Dekarbonisierung (also vereinfacht gesagt der Vermeidung von CO₂-Emissionen), sondern nur zur Defossilisierung (der Vermeidung von fossilen Energieträgern) im Verkehrssektor beitragen. Eine Ausnahme hierzu stellt Ammoniak dar, welches als Kraftstoff für die Schifffahrt diskutiert wird und nicht auf Kohlenstoff, sondern auf Stickstoff basiert.

Darüber hinaus bezeichnet E-Fuels überwiegend Kraftstoffe, die aus chemischer Sicht nahezu identisch mit herkömmlichen fossilen Kraftstoffen sind. Das hat den großen Vorteil, dass sie theoretisch direkt in der bestehenden Infrastruktur wie Tankstellen und Fahrzeugen eingesetzt werden können. Dabei können je nach Herstellungsprozess unterschiedliche Kraftstoffe für alle herkömmlichen Verbrennungsmotoren oder (Flugzeug-)Turbinen produziert werden. Diese werden dann häufig ebenfalls mit einem vorgestellten „E-“ zum Beispiel als E-Benzin, E-Diesel oder E-Kerosin bezeichnet.

Der grüne Wasserstoff, der für die E-Fuel-Produktion benötigt wird, kann auch direkt genutzt werden, um Fahrzeuge anzutreiben. Allerdings sind hierfür andere Antriebskonzepte wie Brennstoffzellen oder Wasserstoff-Verbrennungsmotoren notwendig. Deshalb fällt grüner Wasserstoff üblicherweise nicht unter den Oberbegriff der E-Fuels. Die folgenden Ausführungen beziehen sich dementsprechend ausschließlich auf flüssige E-Fuels.

2.1 Bereitstellung der Ausgangsstoffe

Zur Bereitstellung der für die E-Fuel-Produktion benötigten Ausgangsstoffe Wasser, Wasserstoff und CO₂ stehen unterschiedliche technische Optionen zur Verfügung.

Wasserstoff: Elektrolyse

Im Zusammenhang mit der Herstellung von grünem Wasserstoff wird unter Elektrolyse allgemein die Aufspaltung von Wasser (H₂O) in Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) durch den Einsatz von erneuerbarem Strom verstanden. Dabei kann, je nach Temperatur-niveau, bei dem dieser Prozess stattfindet, zwischen sogenannten Nieder- und Hochtemperaturelektrolyseuren unterschieden werden. Die aktuell am weitesten verbreitete Technologie ist die alkalische Elektrolyse (AEL), bei der eine alkalische Lösung als Elektrolyt eingesetzt wird. Insbesondere im Zusammenhang mit dem Einsatz von fluktuierend verfügbarem erneuerbarem Strom hat sich in den vergangenen Jahren die Polymer-elektrolytmembran-Elektrolyse (PEMEL) aufgrund ihrer höheren Lastflexibilität als weitere Niedertemperatur-elektrolyse etabliert. Die Festoxid-Elektrolyse (SOEL), oft auch als Hochtemperatur-Elektrolyse bezeichnet, arbeitet bei deutlich höheren Temperaturen und benötigt Wasserdampf als Eingangsstoff, zeichnet sich allerdings durch höhere Wirkungsgrade als die Niedertemperaturverfahren aus. Eine Variante der SOEL stellt die sogenannte Co-Elektrolyse dar, bei der neben Wasserdampf auch CO₂ als Ausgangsstoff genutzt wird, wodurch direkt ein Synthesegas bestehend aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid (CO) entsteht. Im Vergleich zu den mittlerweile am Markt etablierten Niedertemperatur-Elektrolyseuren sind die Hochtemperatur-Verfahren bisher nur in kleineren Demonstrationsanlagen realisiert worden.¹¹

10 Die Bereitstellung erfolgt entweder technisch mithilfe sogenannter *Direct-Air-Capture*-(DAC-)Anlagen oder das CO₂ wird über die Photosynthese zunächst in Biomasse gebunden, die anschließend umgewandelt wird, um das CO₂ wieder nutzbar zu machen.

11 IEA (2022).

CO₂: Biomasse und Direct Air Capture

Um CO₂ aus der Atmosphäre abzuscheiden, stehen grundsätzlich zwei unterschiedliche Pfade zur Verfügung: die direkte Abscheidung per *Direct-Air-Capture*-(DAC-)Verfahren oder die indirekte Abscheidung über Biomasse. Bei letzterem wird das CO₂ beim Pflanzenwachstum per Photosynthese aus der Luft aufgenommen und in anschließenden Umwandlungsprozessen wieder freigesetzt. Diese Umwandlung kann zum Beispiel die Biomasse-Verbrennung, Biogas- oder Bioethanol-Produktion sein. Bei der Biogas- und Bioethanol-Produktion entsteht CO₂ als Nebenprodukt der biologischen Umwandlungsprozesse in relativ hoher Konzentration und muss nur noch aufgereinigt werden. Als Nebenprodukt von Verbrennungsprozessen liegt das CO₂ im Abgas in erheblich geringerer Konzentration vor und muss mit deutlich höherem Aufwand abgetrennt und aufgereinigt werden.¹²

Mithilfe des DAC-Verfahrens wird CO₂ direkt aus der Atmosphäre abgeschieden. Diese Verfahren folgen dabei drei grundlegenden Schritten: Mittels Ventilatoren wird Umgebungsluft auf ein Sorptionsmittel geleitet. Dieses bindet das CO₂ an sich. So kann Kohlenstoffdioxid von den anderen in der Luft befindlichen Stoffen getrennt werden. In einem weiteren Prozessschritt wird das CO₂ dann in der Regel unter Zufuhr von thermischer Energie wieder von dem Sorptionsmittel getrennt, sodass am Ende der Prozesskette reines CO₂ vorliegt. Dieses kann dann entweder im Boden verpresst (*Direct Air Capture with Carbon Storage*, DACCS) oder für die Produktion von E-Fuels genutzt werden (*Direct Air Capture with Carbon Usage*, DACCU).¹³

Wasser: Meerwasserentsalzung und Aufbereitung

Für die Herstellung von großen Mengen grünen Wasserstoffs werden entsprechend große Mengen Wasser – etwa 10 Kilogramm je Kilogramm so produzierten Wasserstoffs – benötigt. Für die meisten Elektrolyseverfahren wird hochreines Wasser (sogenanntes Reinstwasser) benötigt. Selbst Trinkwasser muss weiter aufgereinigt werden, um die darin gelösten Salze und Mineralstoffe abzutrennen. Diese Aufreinigung erfolgt üblicherweise in einer dem Elektrolyseur direkt vorangeschaltete Wasseraufbereitung. Darüber hinaus wird

auch an Elektrolyse-Verfahren geforscht, die Meerwasser direkt einsetzen können. Diese Technologien befinden sich bisher allerdings noch im Labormaßstab.

Um den hohen Wasserbedarf ohne nachteilige Auswirkungen auf das Grundwasser insbesondere in den häufig sehr ariden Gunstregionen zur erneuerbaren Stromerzeugung bereitzustellen, werden in der Regel Meerwasserentsalzungsanlagen eingesetzt. Solche Anlagen werden bereits weltweit zur Trink- und Brauchwasserbereitstellung genutzt und können somit als etablierte Technologie angesehen werden. Die am weitesten verbreitete Technologie ist die sogenannte mehrstufige Entspannungsverdampfung, bei der das Meerwasser durch Wärmezufuhr (häufig Abwärme von nahegelegenen Kraftwerken) über mehrere Kondensationsstufen verdampft wird, wobei das Salz auf den Kondensationsböden zurückbleibt. Aufgrund des hohen Energiebedarfs dieses Verfahrens werden vermehrt auch sogenannte Umkehrosmose-Anlagen eingesetzt. Hierbei wird das Meerwasser unter hohem Druck durch eine Membran gepresst, wodurch Salz und andere Verunreinigungen vom Wasser abgetrennt werden können.¹⁴

2.2 Kraftstoffsynthese

Unter dem Oberbegriff *Power-to-Liquid* (PtL) werden unterschiedliche Syntheseverfahren zur Herstellung flüssiger, synthetischer Kraftstoffe verstanden. Dies umfasst im Wesentlichen die Fischer-Tropsch-Synthese zur Herstellung synthetischer Kohlenwasserstoffe (E-Kerosin, E-Diesel), die Methanolsynthese sowie Prozesse zur Weiterverarbeitung von Methanol in synthetische Kohlenwasserstoffe, sogenannte *Methanol-to-X*-Prozesse. Als Ausgangsstoffe werden für alle diese Prozesse grüner Wasserstoff und nachhaltiges CO₂ benötigt.

Fischer-Tropsch-Synthese

Die Fischer-Tropsch-Synthese ist seit Anfang des 20. Jahrhunderts bekannt und wurde ursprünglich zur Produktion von synthetischem Diesel aus der Kohlevergasung entwickelt. Für die Fischer-Tropsch-Synthese wird zunächst ein Synthesegas, das hauptsächlich aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid (CO) besteht,

¹² ifeu (2019).

¹³ Viebahn et al. (2019).

¹⁴ Jones et al. (2019).

benötigt. Zur Herstellung von E-Fuels wird dieses Synthesegas aus der Reduktion von CO₂ in Verbindung mit grünem Wasserstoff gewonnen. Dies geschieht über die sogenannte reverse Wassergas-Shift- (RWGS-) Reaktion. Die technische Umsetzung der RWGS-Reaktion stellt derzeit die größte technische Herausforderung der E-Fuel Produktion dar. Das Produkt der anschließenden Fischer-Tropsch-Synthese ist ein Gemisch aus unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen, das häufig als synthetisches Rohöl oder kurz Syncrude bezeichnet wird.

Dieses Syncrude kann in herkömmlichen Raffinerieprozessen (unter anderem Cracking, Isomerisierung, Destillation) zu chemischen Grundstoffen wie Naphtha (Rohbenzin) oder normenkonformen Kraftstoffen wie Kerosin und Diesel weiterverarbeitet werden. Diese Weiterverarbeitung kann entweder direkt in der Syntheseanlage oder in bestehenden Raffinerien zur Verarbeitung von fossilen Rohstoffen (also primär Rohöl) erfolgen. Wird das Syncrude zu rohölbasierten Produkten zugemischt, spricht man von sogenanntem *Co-Processing*. Grundsätzlich können nach eventuell notwendigen kleineren technischen Anpassungen an Prozessführung oder eingesetzten Katalysatoren bestehende Raffinerieanlagen auch zur ausschließlichen Weiterverarbeitung von Syncrude genutzt werden. Über die Fischer-Tropsch Synthese produziertes E-Kerosin ist für den Einsatz im zivilen Luftverkehr zugelassen und darf fossilem Kerosin aktuell mit einem Anteil von bis zu 50 Prozent beige-mischt werden. E-Diesel darf in Deutschland aktuell fossilem Diesel beigemischt, aber nicht in Reinform an Tankstellen vertrieben werden.

Heutzutage existieren großtechnische Fischer-Tropsch-Anlagen, die bisher jedoch ausschließlich fossile Energieträger wie Kohle (*Coal-to-Liquids*, CtL) oder Erdgas (*Gas-to-Liquids*, GtL) als Ausgangsstoffe nutzen. Die beiden größten GtL-Anlagen der Welt, die Pearl GtL-Anlage von QatarEnergy und Shell und die ORYX GtL-Anlage von QatarEnergy und Sasol, beide in Ras Laffas, Katar haben eine gemeinsame Produktionskapazität von 8,5 Millionen Tonnen pro Jahr.¹⁵ Außerdem wird seit mehreren Jahren an der Nutzung von Biomasse (*Biomass-to-Liquids*, BtL) oder Abfallstoffen (*Waste-to-Liquids*, WtL) als Rohstoff für die Fischer-Tropsch-Synthese gearbeitet. Die ersten solcher industriellen Anlagen werden derzeit unter ande-

rem in den USA gebaut beziehungsweise sind vor kurzem in Betrieb gegangen¹⁶. Sie sind deutlich kleiner als die zuvor genannten Anlagen zur Verarbeitung von fossilen Energieträgern (wenige 100.000 Tonnen Produktion pro Jahr). Erste, ebenfalls noch deutlich kleinere Demonstrationsanlagen (Produktionskapazität etwa 300 Tonnen pro Tag) zur Herstellung von E-Fuels über die Fischer-Tropsch-Synthese, werden derzeit in Deutschland in Betrieb genommen.¹⁷ Weitere größere PtL-Anlagen sind aktuell in Planung.

Methanolsynthese

Methanol ist einer der weltweit am meisten produzierten organischen chemischen Grundstoffe. Es gibt eine installierte Produktionskapazität von mehr als 100 Millionen Tonnen Methanol pro Jahr und die großtechnische Methanolerzeugung (bis zu 10.000 Tonnen pro Tag) ist ein bekanntes modernes Verfahren. Diese konventionellen Methanolproduktionsanlagen verwenden üblicherweise Erdgas oder Kohle als Ausgangsstoff.

Erneuerbares Methanol kann durch die Bereitstellung eines nicht-fossilen Synthesegases (ähnlich zur Fischer-Tropsch-Synthese) ohne wesentliche Änderungen des etablierten Syntheseprozesses hergestellt werden. Auch hier gibt es bereits mehrere kommerzielle Anlagen zur Umwandlung von Biomasse oder Siedlungsabfällen, die aktuell geplant werden oder sich bereits im Bau befinden. Neben dem Einsatz von Synthesegas existieren jedoch auch Syntheseverfahren, die Wasserstoff und CO₂ direkt, also ohne vorherige Reduktion des CO₂, als Ausgangsstoffe umwandeln können. Neben kleineren Demonstrationsanlagen zur Herstellung von E-Methanol zum Beispiel in Island (Produktionskapazität etwa 4.000 Tonnen pro Jahr)¹⁸ werden aktuell deutlich größeren Anlagen geplant.

Methanol-to-X

Neben dem direkten Einsatz als Kraftstoff kann Methanol über unterschiedliche Prozessvarianten in *drop-in*-Kraftstoffe wie Benzin oder Kerosin weiterverarbeitet werden. Dabei werden die Prozesse auch hier häufig nach dem angestrebten Zielprodukt benannt: *Methanol-to-Gasoline* (MtG) zur Herstellung von Benzin und

15 Oxford Business Group (2023).

16 Cision PR Newswire (2022a).

17 Atmosfair (2023); P2X Europe (2022).

18 Carbon Recycling International (2023).

Methanol-to-Jet (MtJ) zur Herstellung von Kerosin. Vom grundsätzlichen verfahrenstechnischen Ablauf und Aufbau ähneln sich diese Prozesse, befinden sich aktuell jedoch in unterschiedlicher technischer Reife. So ist E-Kerosin über die MtJ-Route bisher nicht für den Einsatz im Luftverkehr zugelassen, ein entsprechender Zertifizierungsprozess wurde Anfang 2023 angestoßen.¹⁹

Anlagen zur Synthese von Benzin aus Methanol wurden bereits im vergangenen Jahrhundert betrieben und eine erste Demonstrationsanlage (mit einer Produktionskapazität von etwa 450 Tonnen pro Jahr) zur Herstellung von E-Fuels ist Ende 2022 in Chile in Betrieb gegangen.²⁰ Dahingegen befindet sich der Prozess zur Herstellung von E-Kerosin aus Methanol nach wie vor im Forschungsstadium und es existieren bisher nur Anlagen im Labormaßstab.

¹⁹ Biofuels Central (2023).

²⁰ HIF (2022).

3 | Energieeffizienz: Viel Aufwand, wenig Ertrag

Verglichen mit der direkten Nutzung von Strom ist die E-Fuel-Produktion mit hohen energetischen Umwandlungsverlusten verbunden: Denn zunächst muss der grüne Wasserstoff produziert werden, um daraus mit CO₂ dann E-Fuel herzustellen. Das hat zwei unmittelbare Folgen: Zum einen werden die Kosten für E-Fuels immer deutlich höher sein als die Kosten für die direkte Stromnutzung. Zum anderen entsteht ein deutlich höherer Bedarf an Stromproduktion aus Solar- und Windkraftanlagen, der mit dem damit einhergehenden Flächenbedarf in Verbindung steht.²¹ Dies gilt auch für die E-Fuel-Produktion in besonders sonnen- und windreichen Regionen, selbst wenn hier eine deutlich höhere Flächenausbeute als in Deutschland möglich ist. Daher ist klar: Sollen strombasierte Kraftstoffe in großem Umfang zum Einsatz kommen, können die dafür benötigten Strommengen aus erneuerbaren Energien nicht in

Deutschland produziert werden, die Kraftstoffe müssen dann importiert werden.

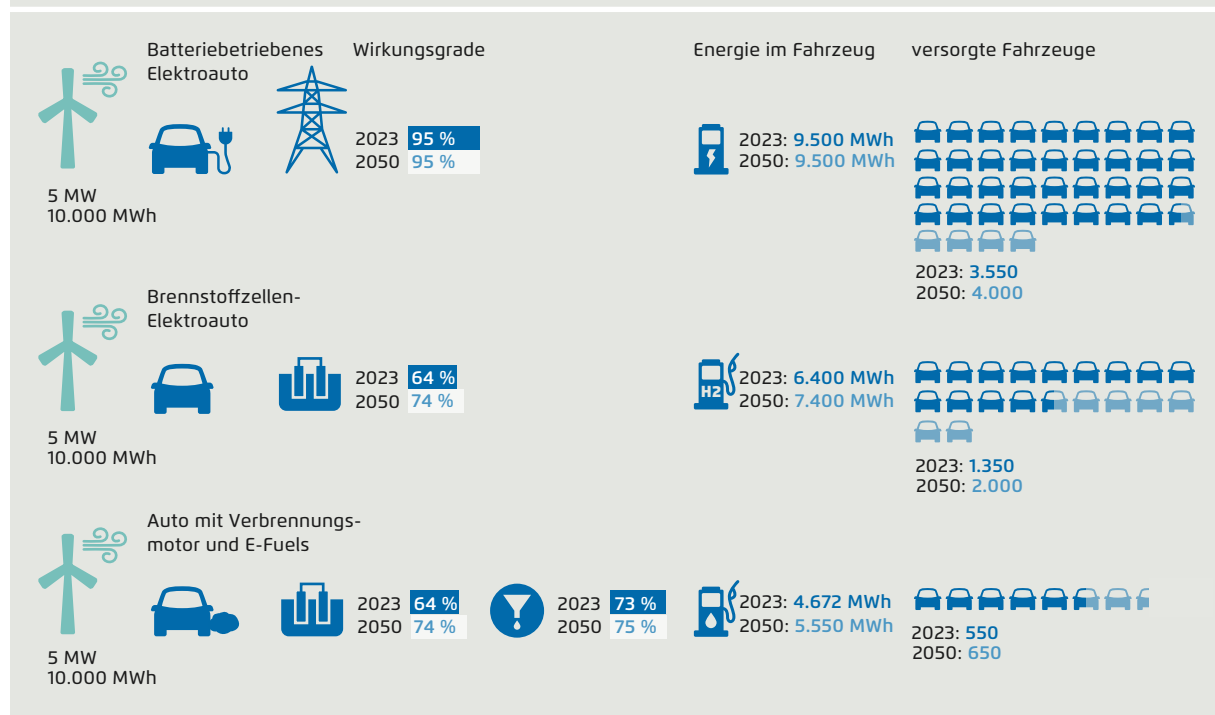
Abbildung 3 illustriert die Umwandlungsverluste beziehungsweise Wirkungsgrade am Beispiele Pkw mit unterschiedlichen Antriebskonzepten, die alle von erneuerbar erzeugtem Strom ausgehen:²² ein batteriebetriebenes Elektroauto, ein Brennstoffzellenauto und ein Auto mit Verbrennungsmotor. Hierbei wird zwischen der Bereitstellung der Energie bis an die Zapfsäule (sogenannte *well-to-tank*-Bilanz) und dem Energieverbrauch des Fahrzeugs (*tank-to-wheel*-Bilanz) unterschieden. Diese sind für die drei Antriebskonzepte grundlegend verschieden. Die Ladesäule bei Elektrofahrzeugen ist direkt mit dem Stromnetz verbunden, die Energie wird in Form von Elektronen direkt übertragen. Für Brennstoffzellen- und Verbrennerfahrzeuge werden wie bisher üblich

21 Agora Verkehrswende; Agora Energiewende (2018).

22 Beispielhafte Werte ohne Berücksichtigung der Vorketten.

Effizienzvergleich unterschiedlicher Antriebsarten für den Einsatz erneuerbarer Energien im Straßenverkehr

Abbildung 3



Agora Verkehrswende (2023) | Hinweis: Kompaktwagen mit einer Laufleistung von 14.000 km/a. Zukünftige Effizienzverbesserungen resultieren aus zu erwartenden Wirkungsgradverbesserungen bei Elektrolyse und Syntheseprozessen. Durchschnittliche Jahresvolllaststunden Windenergieanlage in Deutschland: 2.000 h/a. Quellen: acatech et al. (2017); dena (2021); iea (2021); Öko-Institut (2019)

Kraftstoffe (in diesem Fall Wasserstoff beziehungsweise E-Fuels) als Moleküle über eine Zapfsäule getankt. Dabei treten mit steigender Anzahl der Umwandlungsschritte immer höhere Verluste auf. Es wird direkt ersichtlich, dass mit der Energie aus einem Windrad mehr als sechsmal so viele batteriebetriebene Elektroautos als Verbrenner-Autos mit E-Fuels versorgt werden können.

Die geringsten Verluste bis in den Tank ergeben sich aktuell für das batteriebetriebene Elektroauto. Hier bleiben von der ursprünglichen Energie (10.000 Megawattstunden) an der Ladesäule noch etwa 9.500 (also 95 Prozent) übrig. An zweiter Stelle folgt das Brennstoffzellenauto. Hier macht sich die Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse als Zwischenschritt deutlich bemerkbar. Entsprechend stehen an der Zapfsäule nur noch etwa 6.400 Megawattstunden (also 64 Prozent) der ursprünglichen Energie als Wasserstoff zur Verfügung. Am wenigsten effizient ist die Bereitstellung synthetischer Kraftstoffe, da hier zusätzlich zur Elektrolyse noch weitere Verluste bei der Kraftstoffsynthese hinzukommen. An der Zapfsäule bleiben von dem erneuerbaren Strom nur noch etwa 4.700 Megawattstunden (also 47 Prozent) als E-Fuel erhalten.

Auch in Bezug auf das Fahrzeug selbst setzt sich dieses Bild fort. Beim Verbrennungsmotor entstehen weitere enorme Verluste, da etwa zwei Drittel der im Kraftstoff gespeicherten Energie in Form von Wärme verloren gehen. Brennstoffzellen sind zwar deutlich effizienter, aber auch hier geht ein Teil der Energie durch die Rückumwandlung in Strom verloren. Die geringsten Verluste treten in der Kombination aus Batterie und Elektromotor im Elektrofahrzeug auf. Fasst man alle diese Effekte (*well-to-wheel*-Bilanz) zusammen, lässt sich sehr deutlich veranschaulichen, welcher Anteil der ursprünglichen Energie zum Antrieb von Pkw übrigbleibt. So lassen sich mit der Energie aus einem Windrad deutlich weniger Verbrennerfahrzeuge mit E-Fuels als batteriebetriebene Elektroautos versorgen.

Zukünftig ist von Effizienzsteigerungen in nahezu allen Bereichen der Nutzungskette von erneuerbarem Strom bis zum Fahrzeugantrieb auszugehen. Beim batteriebetriebenen Elektroauto können diese unter anderem durch effizientere Ladesysteme und geringere Batterieverluste hauptsächlich fahrzeugseitig erzielt werden. Brennstoffzellenfahrzeuge profitieren von deutlichen

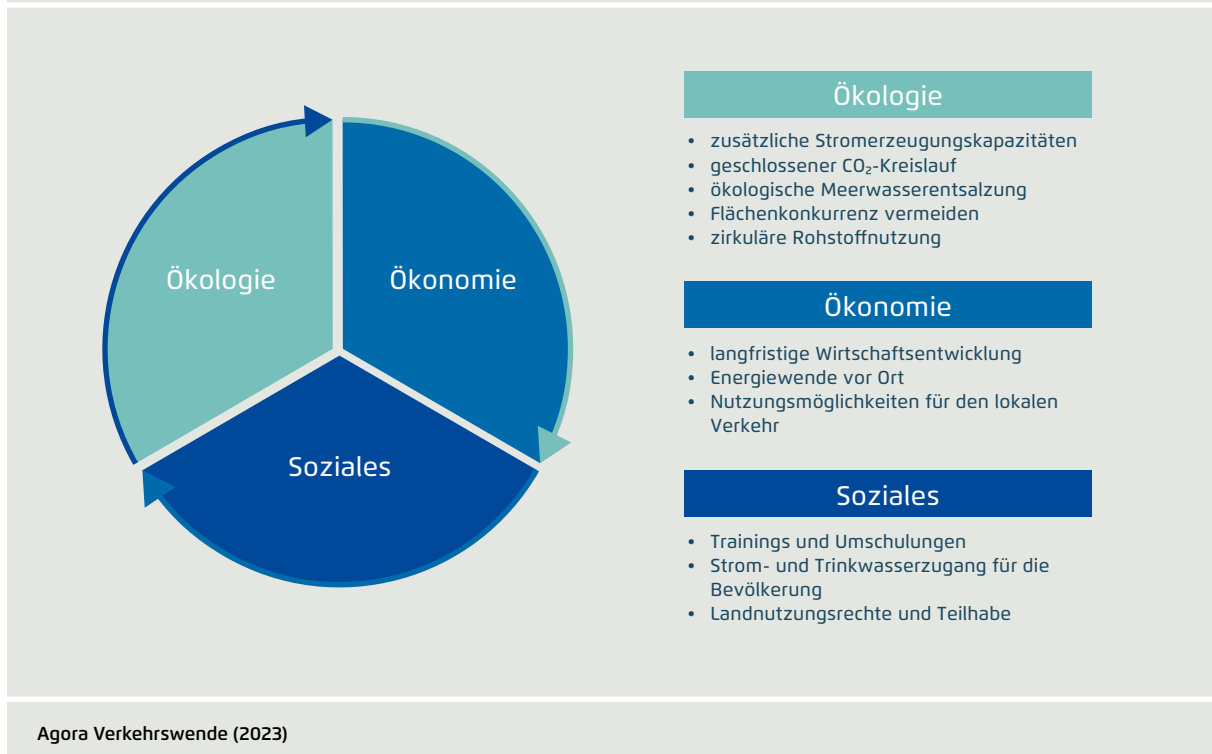
Wirkungsgradverbesserungen sowohl bei der Elektrolyse als auch im Fahrzeug zum Beispiel beim Brennstoffzellenantrieb. Verbrennungsmotoren werden bereits seit Jahrzehnten optimiert, weshalb hier nur noch von geringen Effizienzgewinnen beim Fahrzeug auszugehen ist. Allerdings kann bei der E-Fuel-Produktion sowohl von Wirkungsgradgewinnen bei der Elektrolyse als auch bei den Syntheseverfahren ausgegangen werden. Da aber auch die Syntheseverfahren grundsätzlich seit Jahrzehnten eingesetzt werden, sind hier insgesamt deutlich geringere Verbesserungen von nur einigen Prozentpunkten zu erwarten.

Die Effizienzgewinne sowohl in der Energiebereitstellung als auch den Fahrzeugen selbst lassen sich an der zusätzlichen Anzahl der versorgten Fahrzeuge bis 2050 ablesen. Zusammengenommen lassen sich somit bei batteriebetriebenen Elektroautos etwa 450 (Steigerung um etwa 11 Prozent), bei E-Fuel-Verbrenner etwa 100 (Steigerung um etwa 16 Prozent) und bei Brennstoffzellen-Pkw etwa 650 (Steigerung um etwa 31 Prozent) zusätzliche Fahrzeuge versorgen. Damit bleibt der direkte Einsatz von Strom in Elektrofahrzeugen auch zukünftig mit Abstand die effizienteste Antriebsoption. Für die gleiche Fahrstrecke benötigt das Auto mit Verbrennungsmotor demnach ein Vielfaches mehr an erneuerbarem Strom als ein batteriebetriebenes Elektroauto. Es müssten also deutlich mehr Anlagen zur Erzeugung von erneuerbarem Strom gebaut werden als bei direkter Stromnutzung, verbunden mit entsprechend höheren Kosten der benötigten Umwandlungsanlagen und einem größeren Flächenbedarf.

4 | Nachhaltigkeit: Vielschichtig und unabdingbar

Die drei Dimensionen der E-Fuel-Nachhaltigkeit

Abbildung 4



Derzeit werden E-Fuels hauptsächlich in Zusammenhang mit ihrem Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Verkehr diskutiert. Neben dem Schutz des Klimas unseres Planeten hat die Produktion und Nutzung der Kraftstoffe jedoch ebenso Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft. Deshalb sollte sich eine ganzheitliche Definition der Nachhaltigkeit dieser Kraftstoffe an der Kombination der Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales orientieren, angelehnt an die Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen.²³ Vor allem für Importvorhaben aus Ländern des sogenannten globalen Südens können sich spezifische Anforderungen entlang dieser Dimensionen ergeben, die berücksichtigt werden sollten. Im Folgenden werden einige wichtige Aspekte kurz herausgestellt und deren Zusammenhang beleuchtet.

Grüne Ausgangsstoffe: Strom, CO₂ und Wasser

Zusätzliche Stromerzeugungskapazitäten: Ein Großteil des benötigten Stroms für die Produktion von E-Fuels

entfällt auf die Wasserstoffproduktion per Elektrolyse. Damit die Treibhausgasemissionen aus der Wasserstoffbereitstellung möglichst gering ausfallen, muss der dafür benötigte Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammen. Strom aus dem Bestandsnetz eignet sich vielerorts nicht aufgrund eines nach wie vor hohen Erzeugungsanteils an fossilen Energieträgern. Gleichzeitig sollte der knappe erneuerbare Strom im Netz möglichst effizient direkt eingesetzt werden, um Verluste und die Kompensation durch fossilen Strom zu vermeiden. Die Wasserstoffproduktion bedarf deshalb zusätzlich erbauter Anlagen, die nicht mit dem Ausbau der Erneuerbaren für das Bestandsnetz konkurrieren.²⁴

Geschlossener CO₂-Kreislauf: Für die Synthese von klimaneutralen E-Fuels wird neben Wasserstoff zusätzlich CO₂ aus einem geschlossenen Kreislauf benötigt. Das bedeutet, dass nur jener Kohlenstoff genutzt wird, der zuvor aus der Atmosphäre entnommen wurde. Für die Gewinnung bieten sich die DAC-Technologie oder

²³ Vergleiche hierzu auch die Veröffentlichungen des PtX Hub (2022) und HyPat (2022).

²⁴ Agora Energiewende (2022).

biogene Quellen an. DAC ist standortunabhängig und kann die großen Mengen CO₂ in der Atmosphäre für die Syntheseprozesse verfügbar machen. Die Technologie benötigt aufgrund der geringen CO₂-Konzentration in der Atmosphäre jedoch viel Platz und viel Energie und ist derzeit noch nicht hochskaliert, weshalb so gewonnenes CO₂ kaum verfügbar und noch sehr teuer ist.

Biogenes CO₂ könnte hingegen bereits heute beispielsweise aus Biogas- oder Bioethanolanlagen bereitgestellt werden und ist deshalb wesentlich günstiger. Es bestehen jedoch diverse Risiken hinsichtlich der nachhaltigen Skalierbarkeit, die mit Flächenkonkurrenz mit der Nahrungsmittelindustrie und indirekten Landnutzungsänderungen einhergehen. Dies schränkt die nachhaltige Verfügbarkeit der zukünftig benötigten Mengen ein.²⁵

Ökologische Meerwasserentsalzung: Ein Liter E-Kerosin erfordert 3,6 Liter Wasser in Trinkwasserqualität, hauptsächlich für die Elektrolyse des Wasserstoffs. Gebiete, die über ausreichende Vorkommen und zusätzlich ein hohes Potenzial für die Erzeugung von erneuerbarem Strom für die Elektrolyse verfügen, sind begrenzt. Gerade in sonnenreichen Regionen, die wegen ihres hohen Solarenergiepotenzials für die Produktion von E-Fuels attraktiv erscheinen, gibt es kaum Wasser. Perspektivisch wird daher auch Meerwasserentsalzung angewandt werden. Der Energiebedarf dieser Anlagen muss ebenfalls mit erneuerbaren Energien gedeckt werden, um die CO₂-Bilanz der E-Fuels nicht zu verschlechtern. Außerdem fällt bei der Entsalzung Salzschwamm an, dessen Entsorgung reguliert werden muss.²⁶

Nachhaltige Ressourcennutzung: Flächen und Rohstoffe

Flächenkonkurrenz vermeiden: Die Produktion von E-Fuels braucht weniger Fläche als die Produktion von Biokraftstoffen auf Basis von Energiepflanzen wie Soja, Mais oder Raps. Nichtsdestotrotz ist auch der Flächenverbrauch für DAC-Anlagen, Photovoltaikmodule und Windkraftanlagen signifikant. Konzepte wie Agrophotovoltaik könnten für die Nutzbarmachung von Flächen für den Anbau von Nahrungs- und Futtermittelpflanzen sorgen.²⁷ Auf den Flächenbedarf für die E-Fuel-Produktion

in sogenannten Gunstregionen wird in Kapitel 7 genauer eingegangen.

Zirkuläre Rohstoffnutzung: Die Elektroden für Technologien wie die Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse sowie die Katalysatoren für die Syntheseprozesse zur E-Fuel-Produktion enthalten Metalle wie Platin oder Iridium. Beides kommt in der Natur nur selten vor und ist auf wenige Abbaustandorte begrenzt. Weitere Forschung zur Verringerung der benötigten Mengen ist also unbedingt erforderlich genauso wie Forschung zur Substitution und zum Recycling, das momentan nur in geringem Maß betrieben wird.²⁸

Lokale Wertschöpfung

Langfristige Wirtschaftsentwicklung: Damit der Nutzen zukünftiger E-Fuel-Projekte nicht allein auf zusätzliche Steuereinnahmen und Gewinnbeteiligungen für den Staat beschränkt bleibt, sollten starke Verflechtungen mit lokalen Wirtschaftsstrukturen gefördert werden. Wenn es gelingt, Unternehmen sowohl *upstream* als auch *downstream* in die Wertschöpfungskette einzubinden, werden positive ökonomische Anreize wie die Gründung neuer Unternehmen, Wissensaufbau und Innovation begünstigt. Somit entstehen langfristig nachhaltige Wirtschaftsentwicklung und hochwertige Arbeitsplätze für die Bevölkerung.²⁹

Die lokale Energiewende (im Verkehr)

Energiewende vor Ort: Die Stromversorgung ist in vielen Ländern, die über gute Produktionsbedingungen für E-Fuels verfügen, weiter unzureichend, oder basiert auf fossilen Kraftwerken mit schlechtem Wirkungsgrad. Auf der einen Seite besteht die Gefahr, dass die Fokussierung auf die E-Fuel-Produktion der effizienten Nutzung der erneuerbaren Gunststandorte für die eigene Stromproduktion oder der Defossilisierung des Stromnetzes im Weg steht. Auf der anderen Seite geht die Verbesserung der (erneuerbaren) Stromversorgung mit hohen Kosten einher, die besonders für Länder mit finanziellen Schwierigkeiten nur schwer leistbar sind. Die Investitionen im Zusammenhang mit E-Fuel-Projekten in zusätzliche Stromerzeugungsanlagen könnten eine Chance bieten, den Ausbau der nötigen Infrastruktur auch für den Bedarf vor Ort

25 Viebahn et al. (2019); Fröhlich et al. (2019).

26 BHL; LBST (2022).

27 Jeswani et al. (2020); Fraunhofer ISE (2022).

28 Fraunhofer ISE; E4tech; Fraunhofer IPA (2018); Bahadur et al. (2018).

29 Altenburg et al. (2023).

voranzutreiben. Dazu sollten in den jeweiligen Regionen ein Überbau der Kapazitäten und ein Ausbau des Netzes fester Bestandteil von E-Fuel-Projekten sein.^{30 31}

Nutzungsmöglichkeiten für den lokalen Verkehr: Auch die lokale Energiewende im Verkehr vor Ort spielt eine gewichtige Rolle. Die lokale Bestandsflotte besteht vielerorts noch aus älteren und somit umwelt- und klimaschädlichen Fahrzeugen. Dies gilt explizit auch für Schiffe und Flugzeuge, in denen der E-Fuel-Einsatz prioritär erfolgen sollte. In diesem Zusammenhang sollte auch der Frage nachgegangen werden, inwiefern E-Fuels primär für den Export statt für die Eigennutzung produziert werden sollten – wäre es andersherum sinnvoller? Damit könnte vor Ort ein Beitrag zur dringend notwendigen Begrenzung des Klimawandels geleistet werden.

Eine sozial gerechte Energiewende im Verkehr

Trainings und Umschulungen: Neben den Implikationen für Umwelt und Wirtschaft kann der Hochlauf der E-Fuel-Produktion und -Nutzung fundamentale Folgen für die Existenz vieler Menschen haben. Wenn etwa Jobs in der Förderung fossiler Energieträger verloren gehen oder auch Teile der Wirtschaft in Gunstregionen für Erneuerbare abwandern, geht dies mit Risiken für die Sicherung der Lebensgrundlagen einher. Investitionen in Trainingsmaßnahmen und Umschulungen sind deshalb unerlässlich, um in den neu entstehenden Jobs Fuß fassen zu können.

Strom- und Trinkwasserzugang für die Bevölkerung:

Der hohe Strom- und Trinkwasserverbrauch von E-Fuels kann zusätzlich negative Implikationen für die Versorgungssicherheit der lokalen Bevölkerung haben, vor allem in prekären Regionen. So könnten bestehende Konflikte noch verschärft werden. Ein Überbau der Stromerzeugungs- und auch der Meerwasserentsalzungs-kapazitäten ist deshalb entscheidend für die Zugangsmöglichkeiten für Bürger:innen.³²

Landnutzungsrechte und Teilhabe: Großprojekte im Energiesektor gehen mit beachtlichem Flächenbedarf und, vor allem in Ländern mit instabilen politischen Bedingungen, immer wieder mit der Missachtung von Landnutzungsrechten einher. Um die Rechtswahrung zu

gewährleisten, sollten Governance-Prozesse auf Seiten der Projektverantwortlichen (staatlich wie auch privat) etabliert werden, die Menschen vor Ort eine aufrichtige Teilhabe ermöglicht. Dazu gehören die Schaffung von Foren, in denen Stimmen aus der Zivilgesellschaft einbezogen und ernst genommen werden, oder auch von transparenten Beschwerdemechanismen.³³

Es kann festgehalten werden, dass E-Fuels mit tiefgreifenden Folgen für Menschen, Wirtschaft und Umwelt einhergehen können. Es ist die Aufgabe der Politik, umfassende Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Nutzung und Produktion der Kraftstoffe zu entwerfen, die über den reinen ökologischen Gedanken hinausgehen. Dafür bedarf es vor allem umfassender internationaler Standards und Zertifizierungen. Die Umsetzung ist komplex in Anbetracht dessen, dass dies global erfolgen sollte, um Marktfragmentierung zu vermeiden. Enge internationale Kooperation mit den Partnern auf Augenhöhe ist deshalb unabdingbar. Nur so können E-Fuels zu einer *Just Transition* im Verkehrssektor beitragen.

30 Afful-Dadzie et al. (2020).

31 Vereinte Nationen (2023).

32 Pacific Institute (2023).

33 Backhouse (2019).

5 | Kosten: Auf absehbare Zeit sehr hoch

Die Herstellungskosten von E-Fuels werden im Wesentlichen durch drei Parameter beeinflusst: die laufenden Kosten (häufig auch operative Kosten beziehungsweise OPEX genannt), die Investitionen für den Aufbau der Elektrolyseure und Syntheseanlagen (Investitionsausgaben oder CAPEX genannt) sowie der produzierten Menge E-Fuels.

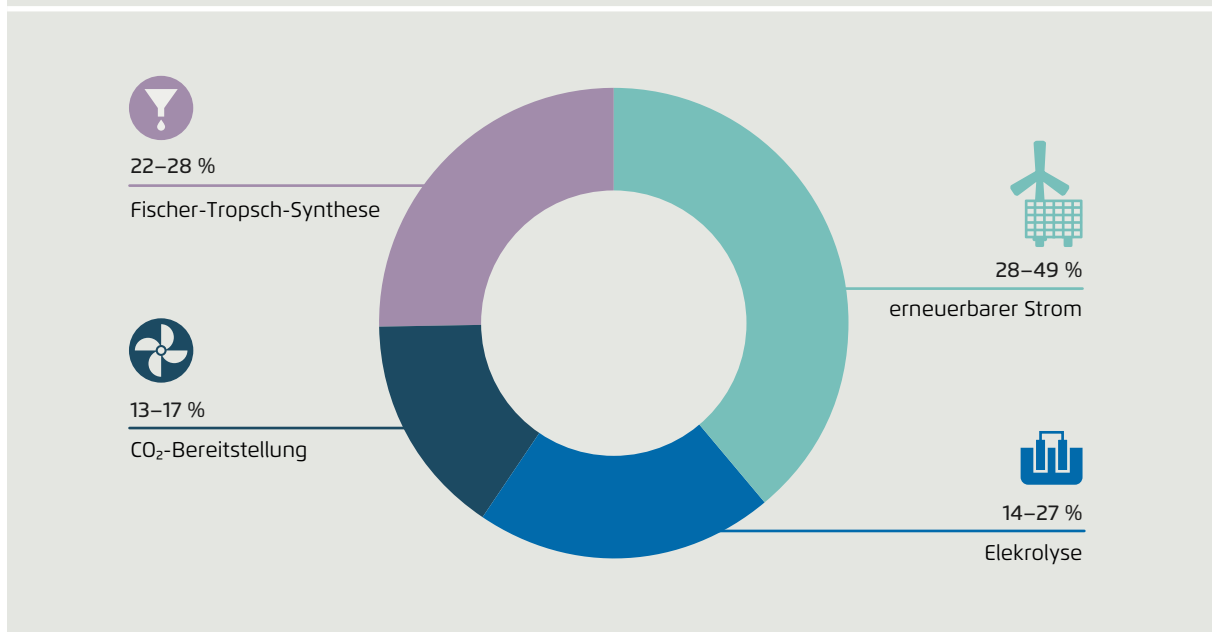
- Dabei haben die Kosten für den erneuerbaren Strom für die Elektrolyse den größten Anteil an den Gesamtkosten und somit auch das größte Kostenreduktionspotenzial. Da die Kosten für erneuerbaren Strom durch die Verfügbarkeit von Sonne und Wind je nach Region stark variieren, unterscheiden sich auch die Herstellungskosten für E-Fuels je nach Produktionsstandort.
- Je nach CO₂-Quelle haben auch die Kosten der CO₂-Bereitstellung einen deutlichen Anteil an den Gesamtkosten: Eine Tonne CO₂, das per DAC aus der Luft gefiltert wird, kostet ein Vielfaches mehr als CO₂, das aus industriellen Punktquellen wie einem Zementwerk abgeschieden wird.
- Darüber hinaus bestimmen die Anlagenauslastung und damit die produzierte Menge E-Fuels den Einfluss der Investitionen auf die Herstellungskosten: Steigt die Auslastung, können die Investitionen auf eine größere Menge E-Fuels verteilt werden und ihr Anteil je produziertem Liter wird kleiner.

Da bisher keine kommerziellen Anlagen zur Produktion von E-Fuels in Betrieb sind, gibt es auch keine verlässlichen Aussagen zu Marktpreisen oder zukünftigen Kosten. In den vergangenen Jahren wurden die zu erwartenden Kosten für unterschiedliche E-Fuels in wissenschaftlichen Veröffentlichungen sowie Studien abgeschätzt. Demnach liegen die Kosten aktuell um das fünf- bis zehnfache über den Kosten vergleichbarer konventioneller Kraftstoffe.

In der Regel steigen die zu erwartenden Kosten mit der Komplexität des Produktionsprozesses sowie den zusätzlich zum Wasserstoff benötigten Ausgangsstoffen. So erscheint E-Ammoniak aktuell als die im Vergleich günstigste Option, gefolgt von E-Methanol bis hin zu

Durchschnittliche Anteile der Investitionen und betriebsgebundenen Kosten an den E-Fuel-Herstellungskosten

Abbildung 5



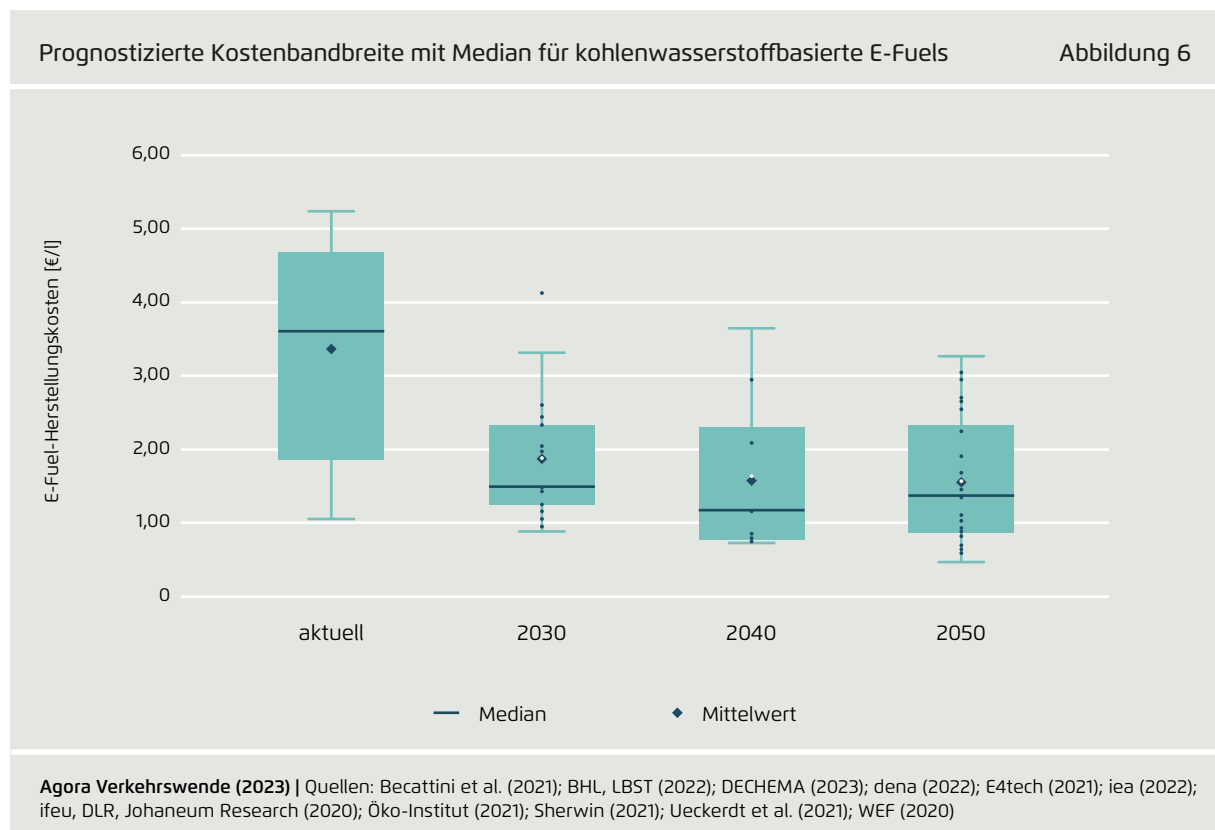
Agora Verkehrswende (2023) | Hinweis: Bandbreite ergibt sich aus unterschiedlichen, betrachteten Anlagestandorten.
Quelle: dena (2022)

synthetischen kohlenwasserstoffhaltigen Kraftstoffen wie E-Kerosin oder E-Diesel über die Methanol- oder Fischer-Tropsch-Route. Mit steigender Produktionskapazität und damit einhergehenden Kostenreduktionen durch Skalen- und Lerneffekte ist davon auszugehen, dass die Herstellungskosten in den kommenden Jahren jedoch deutlich sinken werden.

In Abbildung 6 ist die Auswertung unterschiedlicher Studien zu aktuell und zukünftig zu erwartenden Kosten für die Herstellung von E-Fuels (kohlenwasserstoffhaltige Kraftstoffe über Fischer-Tropsch-Synthese) dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die prognostizierten Kosten je nach unterstellten Annahmen zum Anlagenstandort, zu den Kosten für erneuerbaren Strom oder zur Anlageneffizienz einer starken Streuung unterliegen. Im Mittel werden aktuell Herstellungskosten von etwa 3,85 Euro pro Liter berechnet. Eine besonders große Kostenbandbreite zwischen etwa 2,05 und 4,70 Euro pro Liter zeigt sich in Studien, die die derzeitigen Produktionskosten analysiert haben. Besonders niedrige Kosten ergeben sich in Studien, die bereits heute sehr

günstige Stromquellen mit hohen Volllaststunden wie Wasserkraft in Kombination mit CO₂ aus Punktquellen unterstellt haben. Bei beiden ist das verfügbare Potenzial allerdings sehr gering, weshalb sie sich nicht zur E-Fuel-Massenproduktion eignen. Mittlere Kosten ergeben sich bei einer Kombination von günstigem Strom mit hohen Volllaststunden und einer teuren CO₂-Quelle wie DAC oder niedrigeren Volllaststunden der Stromerzeugung zum Beispiel in Deutschland mit einer günstigeren CO₂-Punktquelle. Sehr hohe Kosten ergeben sich insbesondere für eine Produktion in Deutschland mit CO₂ aus DAC-Anlagen.

Durch zu erwartende Kostenreduktion infolge des notwendigen Markthochlaufs der E-Fuel-Produktion und damit verbundenen Lern- und Skaleneffekten können die Herstellungskosten bis 2050 auf etwa 0,90 bis 2,35 Euro pro Liter fallen. Im Mittel ergeben sich für 2050 Herstellungskosten von etwa 1,40 Euro pro Liter. Allerdings untersuchen solche Studien in der Regel nur die minimalen Herstellungskosten, das heißt zusätzliche Kosten für Transport und Zertifizierung der Kraftstoffe,



Steuern und Umlagen sowie die Gewinnmarge der Produzenten sind in diesen Abschätzungen nicht enthalten. Zum Vergleich, die Herstellungskosten für fossile Kraftstoffe liegen aktuell zwischen 60 und 70 Cent pro Liter – entsprechende Preise allerdings zwischen 1,50 und 1,70 Euro pro Liter. Die Preise für E-Fuels an der Tankstelle dürften also nochmal deutlich höher liegen als ihre Herstellungskosten.

Auch wenn die Prognosen und Abschätzungen für die zu erwartenden E-Fuel-Produktionskosten stark variieren, lassen sich in Verbindung mit den zum Beispiel für die Erfüllung einer nationalen E-Kerosin-Quote³⁴ benötigten Kraftstoffmengen die zusätzlichen Kosten für deren Einsatz abschätzen. Entsprechend der bereits erwähnten Studien zu E-Fuel-Produktionskosten lässt sich E-Kerosin 2030 zu Kosten von etwa 1.900 Euro pro Tonne³⁵ produzieren. Unterstellt man die aktuellen Preise für fossiles Jet A-1 von etwa 850 Euro pro Tonne, ergäben sich somit kurzfristig Mehrkosten von mindestens 1.000 Euro pro Tonne E-Kerosin. Somit würden zur Bereitstellung der etwa 200.000 Tonnen E-Kerosin zur Erfüllung der nationalen PtL-Quote im Luftverkehr in Höhe von zwei Prozent in 2030 zusätzliche Kosten in Höhe von über 200 Millionen Euro entstehen.

34 Für Hintergründe einer solchen Quote siehe Infobox: E-Fuel Regulatorik im nächsten Kapitel.

35 Median der Studien für 2030 bei 1,51 Euro je Liter, unterstelle Dichte 0,8 Kilogramm je Liter.

6 | Verfügbarkeit: Nennenswerte Mengen in weiter Ferne

Ob und wieviel E-Fuels in den nächsten Jahren verfügbar sein werden, lässt sich aktuell nur schwer prognostizieren. Momentan gibt es kaum Anlagen, die bereits E-Fuels produzieren und auch nur wenige, die sich im Bau befinden. Darüber hinaus gibt es öffentliche Ankündigungen zu Bau und Betrieb von E-Fuel-Produktionsanlagen, wobei sich die Projekte jeweils in unterschiedlichen Stadien der Projektumsetzung (generelle Machbarkeitsuntersuchung, Basic/Design-Engineering, Finanzierungsentscheidung bereits getroffen) befinden. Dem gegenüber stehen unterschiedliche regulatorische Maßnahmen, die den Markthochlauf von E-Fuels insbesondere auf der Nachfrageseite sicherstellen sollen, um bestimmte (politische) Ziele zu erreichen. Dies sind insbesondere Quotenverpflichtungen zum Einsatz von E-Fuels in Luft- und Seeverkehr auf deutscher und europäischer Ebene (siehe Infokasten).

Darüber hinaus wurden international mittlerweile auch Maßnahmen ergriffen, um den Produktionshochlauf durch gezielte Vergünstigungen (zum Beispiel Steuervergünstigungen und Zuschüsse im Rahmen des US-amerikanischen *Inflation Reduction Act* (IRA)) zu unterstützen.

E-Fuel Regulatorik

Um den Einsatz Erneuerbarer Energien im Verkehr kontinuierlich zu steigern, wurden auf EU-Ebene verschiedene Verordnungen verabschiedet, die anschließend in nationales Recht der Mitgliedsstaaten übertragen wurden. Eines der Hauptinstrumente ist die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED, Englisch: *Renewable Energy Directive*), die in Deutschland im Bundes-Immissionsschutzgesetz §37 a-h (BImSchG) sowie nachgeordneten Verordnungen (36., 37. und 38. BImSchV) umgesetzt wurde. Darüber hinaus werden im Rahmen des *European Green Deal* verschiedene Verordnungen im sogenannten *Fit-for-55*-Paket finalisiert oder wurden bereits beschlossen. Neben einer Revision der RED umfasst dieses Paket auch konkrete Verordnungen, um den Hochlauf von E-Fuels – insbesondere in der Luftfahrt sowie dem Schiffsverkehr – zu unterstützen. Die für den Markthochlauf von E-Fuels relevantesten Instrumente sind:

Revision der Renewable Energie Directive (RED III).

Im Zuge der Überarbeitung der RED soll den Mitgliedsstaaten die Überführung der bisherigen Ziele (Anteil erneuerbarer Energien im Verkehr) in Treibhausgasemissionsminderungsziele überlassen werden. Hierzu haben sich die Institution in den Trilog-Verhandlungen das Ziel einer Mindesttreibhausgasreduktion von 14,5 Prozent der im Verkehr eingesetzten Energie oder ein Anteil erneuerbarer Energien am Verkehr von 29 Prozent, jeweils für 2030 geeinigt. Außerdem soll eine neue Unterquote für fortschrittliche Biokraftstoffe und RFNBOs (also E-Fuels und Wasserstoff) für den gesamten Verkehrssektor eingeführt werden. Ziel ist eine Beimischung von 5,5 Prozent in 2030, wovon mindestens ein Prozent durch RFNBOs ersetzt werden muss. Die politische Einigung aus den Trilog-Verhandlungen muss noch formal von Parlament und Rat beschlossen werden.³⁶

ReFuelEU Aviation. Eine weitere Maßnahme des *Fit-for-55*-Paketes der Kommission sind die ReFuelEU Pakete mit dem Ziel, die Emissionen in Luft- und Schifffahrt zu reduzieren. Für den Luftverkehr sind dabei in der ReFuelEU Aviation Verordnung konkrete Blending Quoten (das heißt Beimischungsquoten) für nachhaltige Flugturbinenkraftstoffe beziehungsweise SAF (nachhaltige Flugtreibstoffe, Englisch: *sustainable aviation fuels*) sowie Unterquoten für E-Kerosin vorgesehen. Diese sollen von zwei Prozent in 2025 in Fünf-Jahres-Schritten bis 2050 auf 70 Prozent angehoben werden. Die E-Kerosin-Unterquote soll 2030 mit einer Höhe von 1,2 Prozent starten, im Jahr 2032 zwei Prozent betragen und bis 2050 auf 35 Prozent erhöht werden. Im Rahmen der Verordnung soll auch sichergestellt werden, dass alle Airlines, die von Flughäfen innerhalb der EU starten, nachhaltige Kraftstoffe tanken.³⁷

Deutsche E-Kerosin-Quote. Zentrales Instrument für die Umsetzung der RED in deutsches Recht ist die Treibhausgasminderungsquote (THG-Quote). Hierzu wurde 2021 eine Unterquote für strombasierte Kraftstoffe im Luftverkehr (E-Kerosin) beschlossen. Diese sieht in 2026 einen Anteil von 0,5 Prozent E-Kerosin am gesamten Kerosinabsatz

³⁶ Rat der Europäischen Union (2023).

³⁷ Transport & Environment (2023).

in Deutschland vor und soll bis 2030 auf 2,0 Prozent ansteigen. Diese E-Kerosin-Quote verpflichtet lediglich die Inverkehrbringer von Kerosin und ist somit als separater Mechanismus zur allgemeinen THG-Minderungsquote anzusehen. Damit überschreitet das Ambitionsniveau der deutschen PtL-Quote die Vorgaben aus ReFuelEU Aviation. Ob und wie diese beiden Vorgaben miteinander vereinbar sind, ist Stand Mai 2023 noch nicht abschließend geklärt.³⁸

FuelEU Maritime. Die Richtlinie FuelEU Maritime ist eine weitere Maßnahme des *Fit-for-55*-Paketes, um die Emissionen im Schiffsverkehr innerhalb der EU zu reduzieren. Im Rahmen der Verordnung werden alle Schiffe mit einer Bruttoreaumzahl (GT, Englisch: *gross tonnage*) über 5.000, die europäische Häfen anlaufen, verpflichtet, ihre Treibhausgasintensität schrittweise zu reduzieren. Das Reduktionsziel steigt dabei von zwei Prozent in 2025 schrittweise auf 80 Prozent in 2050. Darüber hinaus soll die Richtlinie einen kontinuierlichen Hochlauf erneuerbarer Kraftstoffe in der Schifffahrt ermöglichen. Dazu ist unter anderem eine RFNBO-Beimischung (E-Fuels und grüner Wasserstoff) von mindestens zwei Prozent ab 2034 vorgesehen.³⁹

38 BMUV (2021).

39 Europäisches Parlament (2023).

Über öffentliche Ankündigungen beziehungsweise verfügbare Informationen zu bereits bestehenden Anlagen kann der Produktionshochlauf von E-Fuel-Anlagen bis zum Jahr 2030 abgeschätzt werden. Bis zur Inbetriebnahme solcher Anlagen vergehen durch Entwicklung, Genehmigungsprozesse und Bau üblicherweise drei bis vier Jahre⁴⁰, weshalb es bisher keine konkret angekündigten Projekte über das Jahr 2030 hinaus gibt.

Im Folgenden wurde zwischen Fischer-Tropsch- und Methanol-Anlagen unterschieden. Dies liegt neben unterschiedlicher Prozessführung, Rahmenannahmen sowie der technischen Verfügbarkeit auch an den unterschiedlichen Einsatzgebieten der jeweiligen Produkte. So

werden Fischer-Tropsch-Anlagen häufig zur Produktion von E-Kerosin ausgelegt, es besteht ein klarer Fokus auf die Kraftstoffproduktion und die Defossilisierung der Luftfahrt. Methanol ist hingegen, neben dem direkten Einsatz als Kraftstoff in der Schifffahrt oder der möglichen Weiterverarbeitung zu E-Benzin oder E-Kerosin, auch eine weltweit eingesetzte Basischemikalie. E-Methanol bietet somit auch eine Option zur Defossilisierung der chemischen Industrie und steht damit in direkter Nutzungskonkurrenz zum Verkehrssektor. Selbst wenn einige E-Methanol-Projekte explizit die Kraftstoffproduktion als Ziel haben, wird diese Abgrenzung nicht immer klar kommuniziert. Es ist deshalb nicht davon auszugehen, dass das gesamte zukünftig produzierte E-Methanol für den Verkehrssektor verfügbar sein wird. Da E-Kerosin über den *Methanol-to-Jet*-Prozess bisher noch nicht für den Einsatz im Luftverkehr zugelassen ist, wird diese Option in den weiteren Ausführungen nur cursorisch betrachtet.

Auch wenn E-Ammoniak als weitere E-Fuel-Option in der Schifffahrt diskutiert wird und bereits unterschiedliche großindustrielle Projekte angekündigt wurden, wird er im Folgenden nicht näher betrachtet. Zum einen steht auch E-Ammoniak als Grundstoff für die Düngemittelherstellung in direkter Konkurrenz zu einer stofflichen Nutzung in der chemischen Industrie. Deshalb streben nahezu alle angekündigten Projekte zur Herstellung von E-Ammoniak derzeit diesen Einsatz an. Zum anderen existieren abgesehen von einigen Demonstratoren bisher noch keine kommerziellen Schiffsmotoren, in denen Ammoniak direkt eingesetzt werden kann. Aufgrund der herausfordernden Eigenschaften von Ammoniak – zum Beispiel die Giftigkeit für Menschen und Wasserorganismen – ist nicht absehbar, ob und wann er auch als Kraftstoff eingesetzt werden wird.

6.1 E-Kerosin für die Luftfahrt

Nahezu alle bisher angekündigten oder bereits existierende Fischer-Tropsch-Anlagen werden zur Produktion von E-Kerosin als nachhaltigem Luftfahrtkraftstoff (SAF) konzipiert. Das bedeutet, dass ein möglichst hoher Kerosinanteil angestrebt wird. Als Nebenprodukte fallen nach wie vor E-Naphtha (Rohbenzin) und E-Diesel an. Erfolgt die Weiterverarbeitung direkt in der E-Fuel-Anlage, kann der E-Kerosin-Anteil je nach Bauweise, Betriebs-

40 Insbesondere Planung und Genehmigungsprozesse können bei den ersten Anlagen länger dauern.

bedingungen und Katalysatoren zwischen 50 und 70 Prozent und zukünftig bei bis zu 80 Prozent liegen.⁴¹ Auch wenn bisher noch keine nennenswerten Produktionsanlagen zur Herstellung von PtL-Flugkraftstoffen existieren, werden bereits seit einigen Jahren groß-industrielle Anlagen geplant beziehungsweise deren Bau vorbereitet. Bisher wurden lediglich zwei kleinere Demonstrationsanlagen in Werlte (Atmosfair, Hauptprodukt E-Kerosin) und Hamburg (P2X Europe, Hauptprodukt E-Diesel und E-Wachse für die chemische Industrie) mit einer Produktionskapazität von etwa 350 Tonnen pro Jahr gebaut. Die ersten industriellen Anlagen sollen zwischen 2025 und 2027 in Betrieb gehen und in Europa gebaut werden.

Hauptsächlich aufgrund der lange Zeit unklaren rechtlichen Rahmenbedingungen unter anderem zu den Nachhaltigkeitskriterien für grünen Wasserstoff entsprechend der RED II (Delegierte Rechtsakte zu Artikel 27

und 28) steht die finale Investitionsentscheidung für diese Anlagen bisher jedoch weitestgehend noch aus.⁴² Abbildung 7 zeigt, dass bereits ab 2026 erste größere Mengen E-Kerosin produziert werden könnten, wenn die angekündigten Anlagen wie geplant umgesetzt werden. Dabei beläuft sich die kumulierte globale Produktionskapazität auf etwa 137.000 Tonnen pro Jahr. 2027 und 2030 könnten aller Voraussicht nach weitere Anlagen mit einer zusätzlichen Produktionskapazität von 178.000 Tonnen pro Jahr in Betrieb gehen, sodass insgesamt etwa 315.000 Tonnen E-Kerosin pro Jahr produziert werden könnten. Darüber hinaus ist die erste industrielle Anlage über den *Methanol-to-Jet*-Prozess mit einer Produktionskapazität von etwa 475.000 Tonnen E-Kerosin ab 2030 in den USA angekündigt. Allerdings ist diese Route bisher weder technisch erprobt noch für den Einsatz im Luftverkehr zugelassen. Als Nebenprodukte würden jährlich zusätzlich etwa 54.000 Tonnen E-Naphtha (Rohbenzin) sowie 153.000 Tonnen Diesel produziert, die als Grundstoff in

41 Schär (2022).

42 Ueckerdt; Odenweller (2023).

Auswahl industrieller E-Fuel-Projekte mit avisierte Inbetriebnahme bis 2027

Tabelle 1

Projektname	beteiligte Unternehmen ^a	geplante Kapazität (t/a) ^b	Status ^c	Quelle
–	P2X Europe, The Navigator Company	40.000 (2026)	in Planung	The Navigator Company (2022)
Alpha Plant	Climeworks, Lux-Airport, Norsk E-Fuel, Paul Worth SMS Group, Sunfire, Valinor	10.000 (2024) 20.000 (2026) 80.000 (2029)	in Planung	Norsk E-Fuel (2023)
E-Fuel 1	Nordic Electrofuel	8.000 (2026)	in Planung	Nordic Electrofuel (2023)
Green Fuels Hamburg	Airbus, Siemens Energy, Uniper	10.000 ^d (2026)	in Planung	Green Fuels Hamburg (2023)
Reuze	Engie, Infinium	100.000 (2026)	in Planung	Ineratec (2022)
SynKero	City of Amsterdam, KLM, Port of Amsterdam, Royal Schiphol Group, SkyNRG, SynKero	50.000 ^d (2027)	in Planung	Synkero (2023)
Vordingborg eFuels plant	Arcadia eFuels	80.000 (2026)	in Planung	Arcadia eFuels (2022)

a In alphabetischer Reihenfolge; Aufgelistete Unternehmen wurden in öffentlicher Kommunikation im Zusammenhang mit den Projekten genannt, dies bedeutet keine finanzielle Beteiligung am Projekt.

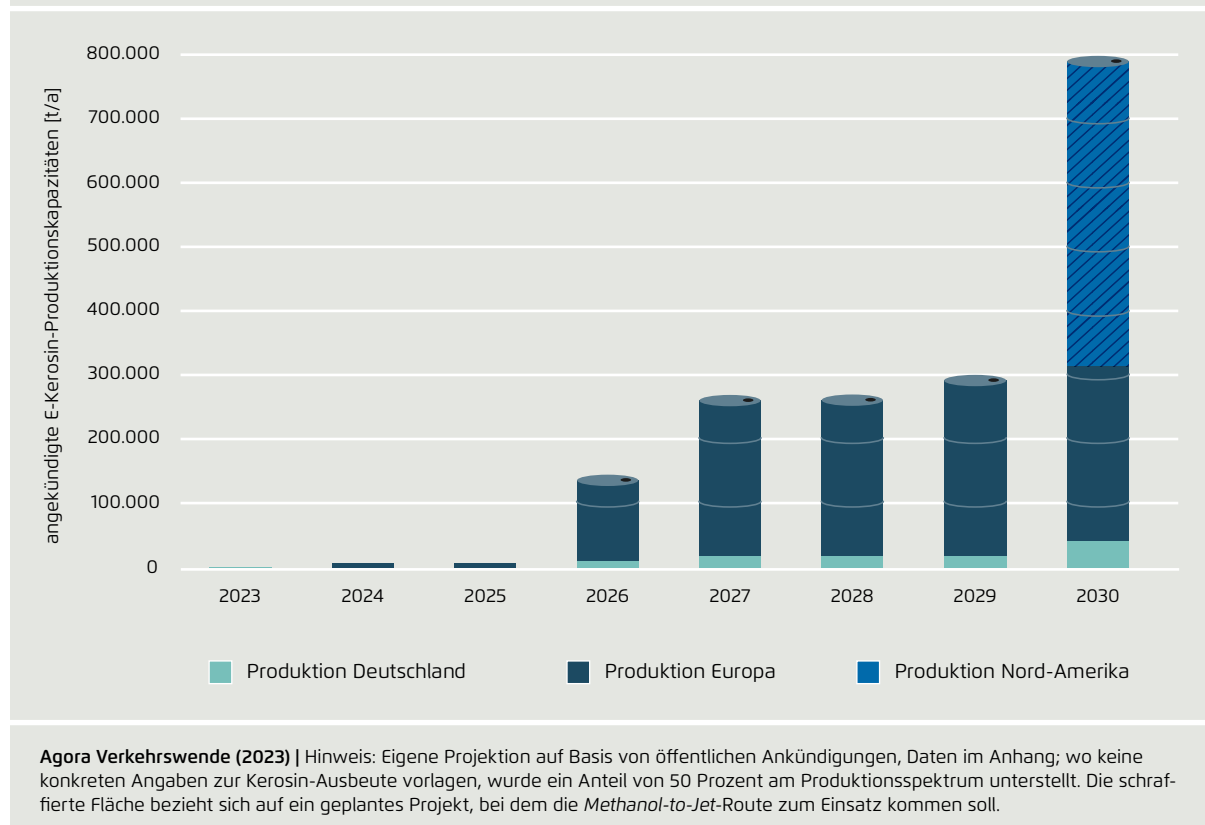
b Jeweils geplante Gesamtkapazität; Jahresangabe bezieht sich auf angekündigte Inbetriebnahme beziehungsweise Erweiterung.

c Entsprechend der öffentlichen Ankündigungen auf dem Stand August 2023; „in Planung“ umfasst alle Projektphasen von Machbarkeitsuntersuchungen bis zum konkreten Engineering.

d Angabe bezieht sich nur auf E-Kerosin.

Erwartete weltweite E-Kerosin-Produktionskapazität bis 2030

Abbildung 7



der chemischen Industrie beziehungsweise anderen Verkehrssegmenten wie der Schifffahrt eingesetzt werden könnten. Damit diese Mengen rechtzeitig zur Verfügung stehen, muss aufgrund der üblichen Bauzeiten solcher Anlagen spätestens 2023 mit dem Bau begonnen werden.

Um 2030 den deutschen Bedarf an E-Kerosin zur Erfüllung der ReFuelEU-Aviation-Vorgaben (circa 123.000 Tonnen) zu decken, wäre etwa ein Drittel der global zu erwartenden E-Kerosin-Produktion notwendig. Um den steigenden Bedarf durch die Anhebung der E-Kerosin-Unterquote auf zwei Prozent 2032 zu decken (etwa 205.000 Tonnen), wären bereits zwei Drittel der aktuell angekündigten weltweiten Produktion notwendig. Im Vergleich hierzu liegt der deutsche Kerosinverbrauch nur bei etwa drei Prozent des globalen Verbrauchs.⁴³ Durch

die europaweit geltende Quote, entstehen Bedarfe, die die derzeit absehbare weltweite Produktion deutlich übersteigen. Bereits 2030 entsteht in der EU ein Bedarf von etwa 570.000 Tonnen E-Kerosin. 2032 steigt der Bedarf auf etwa 950.000 Tonnen und beläuft sich damit fast auf das Dreifache der angekündigten Produktionskapazität. Selbst wenn die Produktion über die *Methanol-to-Jet*-Route aus den USA einbezogen wird, läge die Gesamtproduktionskapazität nach wie vor deutlich unter dem Bedarf der EU. Es wären allein für Europa entsprechend deutlich größere Produktionskapazitäten notwendig als bisher geplant. Dieser Vergleich zeigt auf, dass ambitionierte Quoten allein für den notwendigen Produktionshochlauf bisher nicht ausreichen. Es bedarf auch flankierender Maßnahmen, um die Angebotsseite anzureizen.

Um die zur Deckung dieser PtL-Quoten benötigten E-Kerosin-Mengen produzieren zu können, werden neben den eigentlichen Synthesenanlagen auch Elektrolyseure zur Wasserstoffproduktion sowie ausreichende

43 Kerosinverbrauch 2019: Deutschland 10,24 Millionen Tonnen, weltweit 331,56 Millionen Tonnen (U.S. Energy Information Administration (2023)).

Mengen erneuerbaren Stroms benötigt. Da erneuerbarer Strom ein knappes Gut ist, das zur Dekarbonisierung aller Sektoren unserer Volkswirtschaft benötigt wird, sollte der für die E-Fuel-Produktion benötigte Strom aus zusätzlich installierten Anlagen – zum Beispiel On- und Offshore-Windenergieanlagen sowie Photovoltaikanlagen – stammen.

Konkret heißt das: Sollten die in Deutschland zur Erfüllung der ReFuelEU Aviation E-Kerosin-Unterquote ab 2032 benötigten Mengen in Deutschland produziert werden, wären zusätzliche Elektrolysekapazitäten von 0,9 bis 1,8 Gigawatt⁴⁴ nötig. Zum Vergleich: 2022 lag die weltweit installierte Elektrolyseleistung bei etwa

1,4 Gigawatt.⁴⁵ Auch wenn ein schneller Hochlauf der Elektrolysekapazität erwartet wird, liegt der Fokus der Projekte vorrangig auf der Dekarbonisierung der Industrie zum Beispiel bei der Stahl- und Düngemittelproduktion oder der chemischen Industrie.

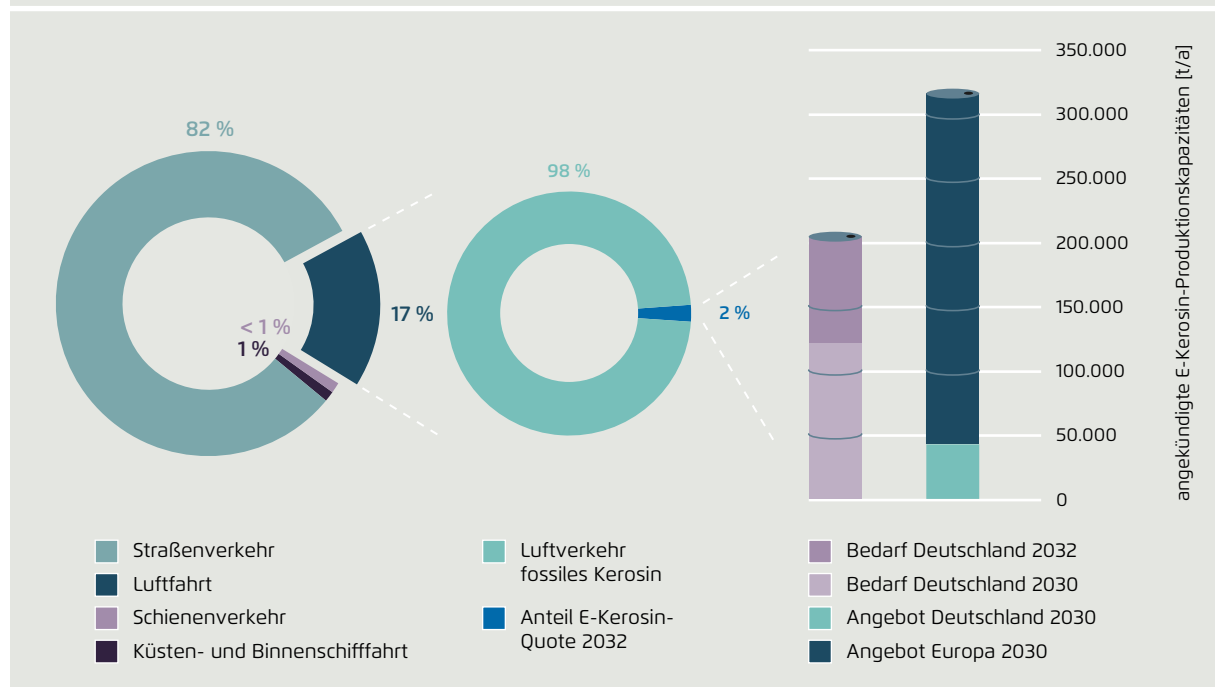
Insgesamt würden etwa 7,5 Terrawattstunden erneuerbarer Strom benötigt, um ausreichend E-Kerosin zu produzieren. Würde der hierfür benötigte erneuerbare Strom ausschließlich über Photovoltaikanlagen in Deutschland erzeugt, müssten etwa sechs Gigawatt zusätzliche Leistung installiert werden. Das entspricht etwa zehn Prozent aller derzeit in Deutschland installierten Photovoltaikanlagen. Um diesen Zubau zu ermöglichen müssen auch entsprechende Flächen bereitstehen, für Freiflächen-Photovoltaikkraftwerke wären dies etwa 195 Quadratkilometer – das entspricht in etwa der doppelten Fläche von Sylt.

44 Die Bandbreite ergibt sich aus den unterstellten Volllaststunden der Elektrolyseure (4.000 bis 8.000 Stunden pro Jahr), benötigte Speicherkapazitäten wurden nicht berücksichtigt, da sich diese hauptsächlich in den Produktionskosten niederschlagen würden.

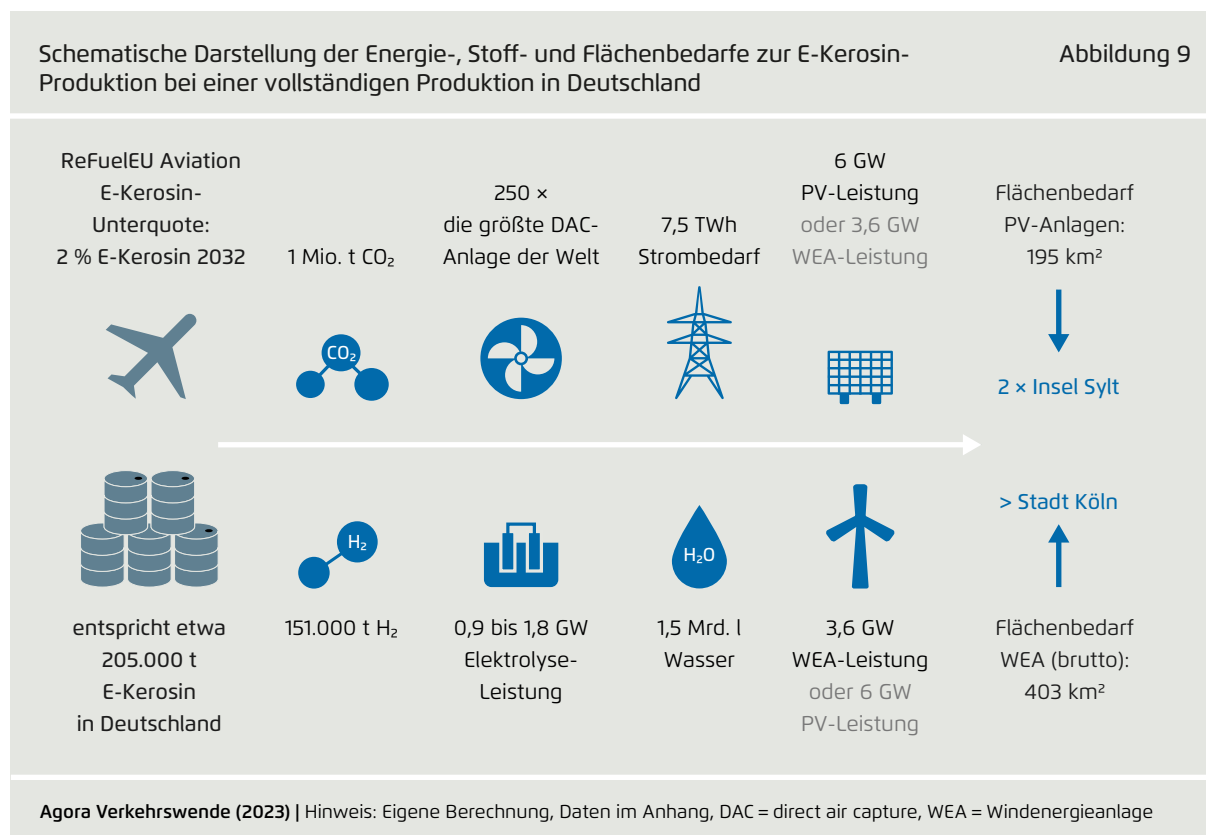
45 iea (2022).

E-Kerosin-Bedarf und -Angebot

Abbildung 8



Agora Verkehrswende (2023) | Hinweis: Eigene Projektion auf Basis von öffentlichen Ankündigungen, Daten zu E-Kerosin-Angebot im Anhang; Kerosinbedarf basiert auf Kerosinabsatz von 2019; wo keine konkreten Angaben zur Kerosin-Ausbeute vorlagen, wurde ein Anteil von 50 Prozent am Produktionsspektrum unterstellt. Angekündigte Produktion über Methanol-to-Jet-Route wurde nicht aufgenommen, da Zulassung für Luftverkehr unklar. Quelle: AG Energiebilanz (2021)



Alternativ könnte der benötigte Strom auch über Onshore-Windenergieanlagen erzeugt werden. Hierzu müssten in Deutschland zusätzliche Windenergieanlagen mit einer Leistung von etwa 3,6 Gigawatt zugebaut werden. Immerhin mehr als fünf Prozent der derzeit in Deutschland installierten Leistung solcher Anlagen. Die hierfür benötigte Fläche belief sich auf etwas über 4,3 Quadratkilometer (etwa die doppelte Fläche des Stadtstaats Monaco) – wenn nur die reine Bau- und Zufahrtsfläche zwischen den Anlagen berücksichtigt wird. Um Verschattungseffekte zu vermeiden, müssen die Windenergieanlagen in der Realität allerdings weiter von einander entfernt liegen. Somit würden sich die benötigten Anlagen über eine Gesamtfläche von etwa 430 Quadratkilometer verteilen, also mehr als das Kölner Stadtgebiet.

Die zusätzlich zu installierende Leistung an Photovoltaik- bzw. Windenergieanlagen sowie die dafür benötigte Fläche würde sich bei der Produktion in Regionen mit günstigeren Bedingungen und anschließendem E-Fuel-Import nach Deutschland entsprechend redu-

zieren. Allerdings müssten auch hier enorme zusätzliche Anlagenkapazitäten mit einem entsprechenden Flächenbedarf installiert werden (dies wird im nächsten Kapitel genauer diskutiert).

Zusätzlich zu diesen Strom- und Flächenbedarfen wird auch nachhaltiges CO₂ als zusätzlicher Rohstoff benötigt. Um die bereits erwähnte E-Kerosin-Quote im Jahr 2032 zu decken, wären etwa eine Million Tonnen CO₂ notwendig, das entweder aus der Luft oder aus biogenen Quellen bereitgestellt werden sollte, um einen geschlossenen CO₂-Kreislauf zu realisieren. Im Vergleich hierzu kann die größte DAC-Anlage, die weltweit in Betrieb ist, aktuell gerade einmal 4.000 Tonnen pro Jahr aus der Luft abscheiden⁴⁶ – bis 2030 wären also 250 solcher Anlagen notwendig.

⁴⁶ Die aktuell größte Anlage mit dem Projektnamen „Orca“ wird von Climeworks in Island betrieben. Die nächstgrößere Anlage unter dem Namen „Mammoth“ mit einer geplanten Kapazität von 36.000 Tonnen CO₂ pro Jahr wird aktuell gebaut. Climeworks (2023a); Climeworks (2023b).

Um den Nachhaltigkeitskriterien der RED zu genügen, könnte bis 2035 (und in bestimmten Fällen bis 2040) fossiles CO₂ aus industriellen Punktquellen eingesetzt werden. Somit könnte ein kurzfristiger Anlagenhochlauf mit günstigem CO₂ erreicht werden. Allerdings würde beim Einsatz der E-Fuels weiterhin zusätzliches fossiles CO₂ emittiert werden. Damit diese Anlagen perspektivisch CO₂-neutrale E-Fuels produzieren können, muss bereits bei der Anlagenplanung die zukünftige Bereitstellung von nachhaltigem CO₂ aus der Atmosphäre berücksichtigt werden.

Neben Flugkraftstoffen entsteht bei der Synthese zusätzlich E-Naphtha (auch Rohbenzin genannt) – ein wichtiger Grundstoff für die chemische Industrie und ein Vorprodukt von Benzin – sowie E-Diesel. So würden neben den zur Erfüllung der nationalen PtL-Quote benötigten 200.000 Tonnen E-Kerosin auch etwa 35.000 Tonnen E-Naphtha (etwa 0,2 Prozent des deutschen Benzinabsatzes 2019) und 100.000 Tonnen

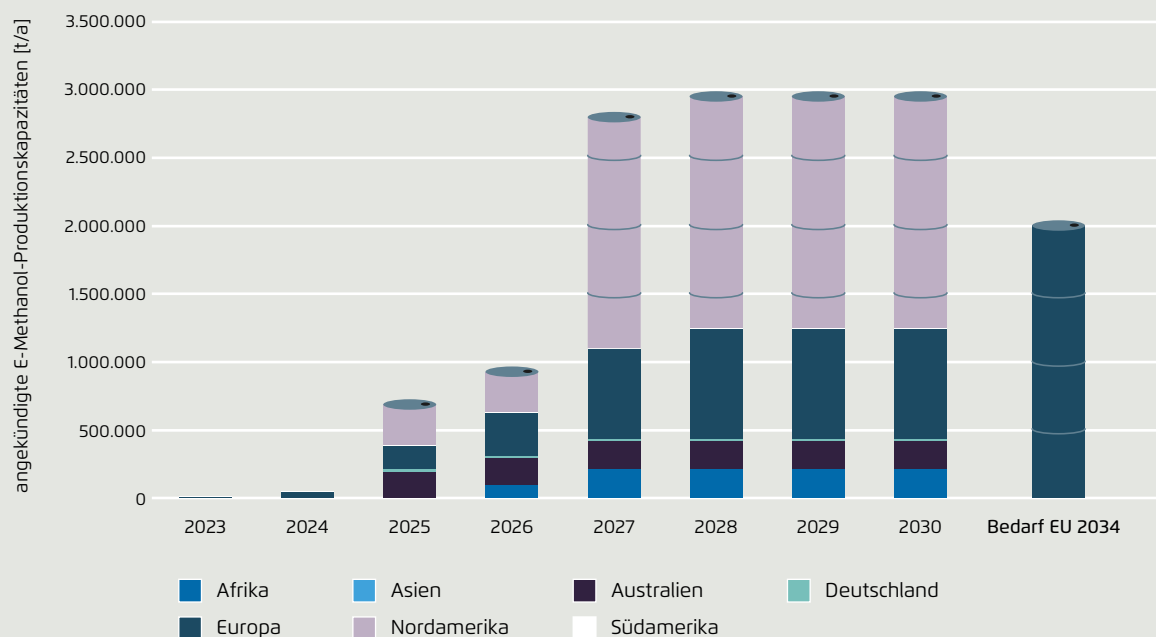
E-Diesel (etwa 0,3 Prozent des deutschen Dieselabsatzes 2019) entstehen. Diese unvermeidbaren und ebenfalls CO₂-neutralen Nebenprodukte können entsprechend zur Defossilisierung der chemischen Industrie oder anderen, schwer zu dekarbonisierenden Verkehrssegmenten wie der Schifffahrt genutzt werden.

6.2 E-Methanol für die Schifffahrt

Zur Produktion von E-Methanol wurden im Vergleich zur Fischer-Tropsch-Route bereits deutlich größere Produktionskapazitäten angekündigt. Dies liegt unter anderem an der einfacheren Prozessführung sowie dem breiten Anwendungsfeld von Methanol. So kann das Methanol theoretisch sehr flexibel nach aktuellen Marktgegebenheiten als Grundstoff in der chemischen Industrie, als Kraftstoffzusatz oder Substitut in der Schifffahrt oder für die Weiterverarbeitung zu *drop-in*-fähigen Kraftstoffen wie E-Benzin (MtG,

Erwartete weltweite E-Methanol-Produktionskapazitäten bis 2030 im Vergleich zum EU-Bedarf 2034

Abbildung 10



Agora Verkehrswende (2023) | Hinweis: Eigene Projektion auf Basis von öffentlichen Ankündigungen, Daten im Anhang. Bedarf EU entsprechend FuelEU-Maritime-Quote von 2 % in 2034

Methanol-to-Gasoline-Prozess) oder E-Kerosin (*MtJ*, *Methanol-to-Jet*-Prozess) eingesetzt werden. Dementsprechend sind nach aktuellen Ankündigungen mehrere Anlagen mit unterschiedlicher Produktionskapazität (10.000 bis über 1 Million Tonnen pro Jahr) geplant, die zwischen 2025 und 2027 in Betrieb gehen sollen. Zusammen belaufen sie sich auf eine kumulierte Jahresproduktion von etwa 3 Million Tonnen E-Methanol ab 2027. Dabei geht etwa die Hälfte der absehbaren Produktionskapazitäten auf ein angekündigtes Großprojekt von HIF Global in den USA zurück. Sollte dieses Projekt nicht, oder nur in kleinerem Maßstab, realisiert werden, könnte die weltweit verfügbaren E-Methanol-Mengen also deutlich geringer ausfallen.

Auch wenn bei einigen Projekten bereits Kooperationen zum Einsatz des E-Methanols als Kraftstoff im Schiffsverkehr bestehen, ist nicht klar, welche Mengen tatsächlich für den Verkehrssektor zur Verfügung stehen werden. Zumindest ein Teil des Methanols soll vor Ort direkt zu Benzin weiterverarbeitet werden, wodurch ab 2027 etwa eine Million Tonnen E-Benzin produziert werden könnten. Für die in der Abbildung dargestellte Gesamtübersicht wurde zunächst die gesamte Methanolproduktion angegeben.

In der EU wurden 2019 etwa 46 Millionen Tonnen Schiffstreibstoffe verbraucht.⁴⁷ Legt man diese Zahl auch für 2034 zugrunde und geht von einer ausschließlichen Beimischung von E-Methanol in Höhe von zwei Prozent entsprechend der FuelEU Maritime Verordnung aus, wären hierfür etwa 1,84 Millionen Tonnen E-Methanol notwendig.⁴⁸ Das ist etwas über die Hälfte der bis 2030 angekündigten weltweiten Produktion an E-Methanol. Im Gegensatz zur Luftfahrt, bei der die möglichen Kraftstoffoptionen durch strikte Zertifizierungssysteme klar vorgegeben sind, stehen für die Schifffahrt allerdings unterschiedliche Kraftstoffoptionen zur Verfügung. Neben E-Methanol, für das es bereits konkrete Schiffsneubauten gibt, können auch E-Ammoniak, E-Diesel oder Wasserstoff eingesetzt werden.

47 European Commission (2021).

48 Aufgrund des höheren Energiegehaltes von Diesel wird etwa die doppelte Menge Methanol benötigt, um dieselbe Energiemenge bereitzustellen: unterstellter Heizwert Diesel = 43 Megajoule pro Kilogramm, unterstellter Heizwert Methanol = 19,9 Megajoule pro Kilogramm.

7 | Importe: Flächenbedarf auch in Gunstregionen enorm

Die bisherigen Ausführungen machen deutlich, dass die E-Fuel-Bedarfe allein zur Defossilisierung des Luft- und Seeverkehrs immens sind. Die für die umfangreiche Produktion benötigten Strommengen können nicht allein in Deutschland oder in Europa erzeugt werden. Importe aus Regionen mit viel Potenzial für Wind- und Solarenergie und Zugang zu Wasser werden nötig sein.

Doch auch in den sogenannten Gunstregionen, zum Beispiel an Meeresküsten und in der Nähe des Äquators, dürfen die Ausbauanforderungen für erneuerbare Energien und die damit verbundenen Flächenbedarfe nicht unterschätzt werden. Gerade in der Diskussion um die Nutzung von E-Fuels im Straßenverkehr wird diese Problematik kaum thematisiert. Was würde es für Gunstregionen bedeuten, sollten E-Fuels sowohl in Deutschland als auch in der EU bedarfsdeckend im Straßenverkehr eingesetzt werden?

Im Jahr 2019 lag der Verbrauch von Benzin und Diesel hierzulande zusammen bei etwa 49,2 Millionen Tonnen.⁴⁹ Um diese Menge komplett synthetisch herzustellen, werden in etwa 1.000 Terrawattstunden erneuerbarer Strom benötigt.⁵⁰ Dies entspricht etwa dem doppelten Stromverbrauch Deutschlands im selben Jahr (507 Terrawattstunden).⁵¹ Wollte man diesen Strom mit Photovoltaikanlagen an einem der dafür weltweit günstigsten Standorte in Südamerika produzieren, müssten dort circa 440 Gigawatt neu installiert werden. Dies entspricht etwa 2,7-mal der installierten Photovoltaikleistung in der gesamten EU (164 Gigawatt).⁵² Die dafür benötigte Fläche beträgt etwa 10.110 Quadratkilometer.

Mit Onshore-Windanlagen wäre die benötigte Leistung geringer, weil diese im Vergleich zu Photovoltaikanlagen mehr Volllaststunden erreichen. Aber mit 195 Gigawatt wäre die Leistung immer noch größer als die derzeit in der EU installierte Leistung (188 Gigawatt).⁵³ Die benötigte Fläche für Windenergieanlagen ist aufgrund des

erforderlichen Abstands deutlich größer als bei Photovoltaikanlagen. Für Onshore-Windanlagen mit einer Leistung von insgesamt 195 Gigawatt müssten ungefähr 23.140 Quadratkilometer bebaut werden. Doch lassen sich die Abstandsflächen zwischen den Windkraftanlagen für andere Zwecke nutzen, weshalb der Nettoflächenbedarf – also die reine Fläche der Anlagen und Zufahrtswege – mit etwa 230 Quadratkilometer deutlich geringer ist.

Diese Zahlen fallen noch drastischer aus, wenn man nicht nur in Deutschland den Verbrauch von Benzin und Diesel mit E-Fuels substituieren möchte, sondern in der gesamten EU. Der Verbrauch in der EU lag 2019 bei etwa 334,4 Millionen Tonnen.⁵⁴ Der benötigte Strombedarf für E-Fuels als Ersatz von Benzin und Diesel im Straßenverkehr läge dementsprechend bei etwa 6.790 Terrawattstunden und damit mehr als zweieinhalbmal so hoch wie der gesamte Stromverbrauch der EU-Staaten im selben Jahr (2.563 Terrawattstunden).⁵⁵ Um den Strom mit Photovoltaikanlagen zu erzeugen, wäre eine Kapazität von etwa drei Terrawatt erforderlich. Auch die benötigten Windkapazitäten wären mit 1,3 Terrawatt enorm. Diese übersteigen sogar die jeweilige derzeit weltweit installierte Leistung (843 Terrawatt beziehungsweise 825 Terrawatt).⁵⁶ Dementsprechend hoch ist auch der Flächenbedarf: Für Photovoltaikanlagen liegt er bei 68.750 Quadratkilometer und für Onshore-Windenergieanlagen (nur für Anlagen und Zufahrtswege) bei 1.575 Quadratkilometer. Realistisch müssten die Windenergieanlagen aber über eine Fläche von etwa 157.400 Quadratkilometer verteilt werden.

Abbildung 11 visualisiert diese Flächenbedarfe auch im Hinblick auf die benötigte Produktion für den Luft- und Seeverkehr. Als besonders gefragtes Land für die Produktion von E-Fuels gilt Chile. Wollte man den gesamten Kraftstoffbedarf in der EU dieser zwingend auf E-Fuels angewiesenen Sektoren mit Strom aus Photovoltaikanlagen produzieren, würden bereits etwa 1,2 Terrawatt und 28.120 Quadratkilometer Fläche benötigt, was fast 40 Prozent einer der größten und dünnbesiedelten Region Chiles – der Atacama – entspräche. Käme dann auch noch der Straßenverkehr

49 AG Energiebilanzen e.V., (2021).

50 Der hier kalkulierte Strombedarf inkludiert die Wasserstoffproduktion, das DAC und die E-Fuel-Synthese. Die zur Berechnung der Flächen- und Energiebedarfe angenommenen Randbedingungen können im Datenanhang eingesehen werden.

51 Statista (2023).

52 Eurostat (2023).

53 Eurostat (2023).

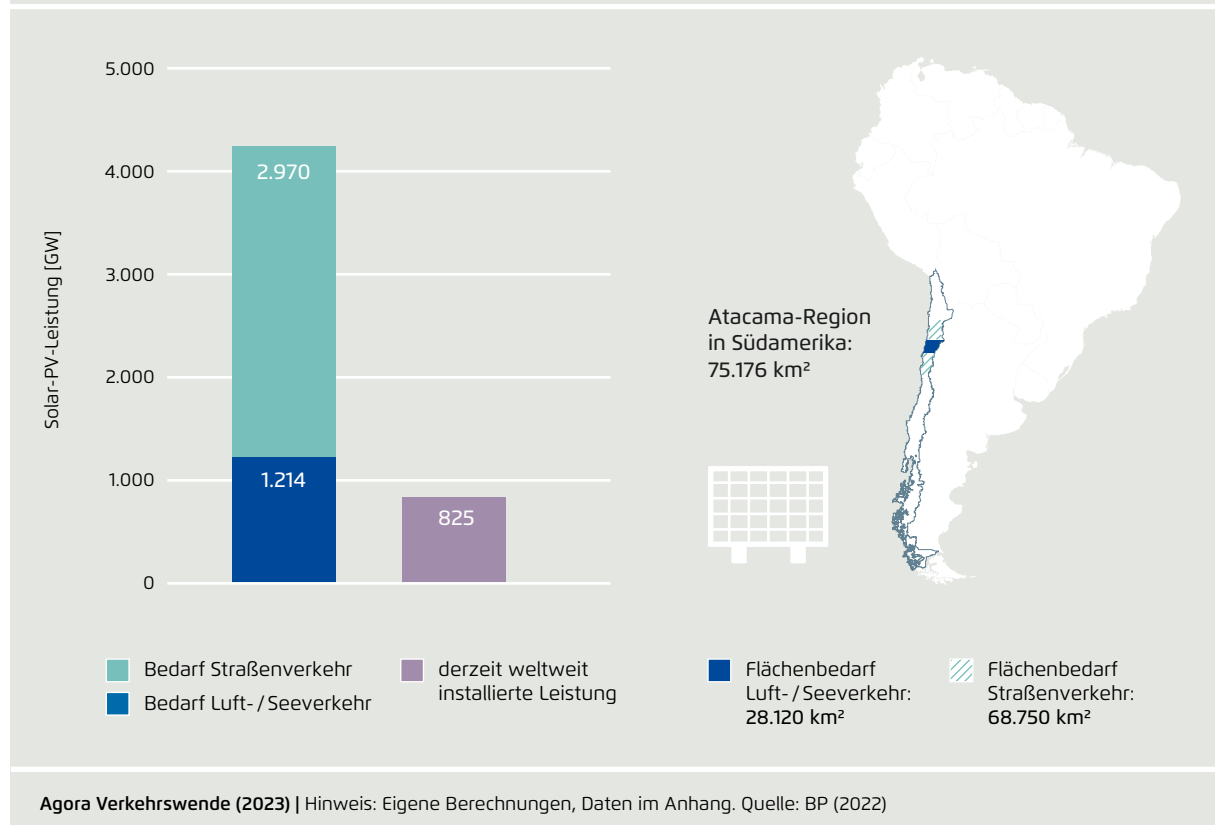
54 U.S. Energy Information Administration (2023).

55 Eurostat (2023).

56 BP (2022).

Flächenbedarf für PV-Anlagen zur bedarfsdeckenden E-Fuel-Produktion der EU-Länder

Abbildung 11



hinzu, würden weitere 68.750 km² belegt. Damit würde die gesamte Atacama-Region nicht ausreichen, um ausreichend Photovoltaikstrom für den Kraftstoffbedarf von Europas Straßen-, Luft- und Seeverkehr zu erzeugen.

Das Beispiel zeigt, dass E-Fuels keine realistische Option sein können, um eine vollständige Substitution des Benzin- und Dieselverbrauchs in Deutschland oder der EU zu erreichen, auch nicht mithilfe von Importen aus Gunstregionen. Bereits für den Einsatz in den schwer zu defossilisierenden Sektoren Luft- und Schiffsverkehr werden enorme Kapazitäten erneuerbarer Energien und Flächen benötigt werden. Jedes zusätzliche Verkehrssegment, in dem E-Fuels zum Einsatz kommen, geht mit weiterer Beanspruchung von signifikanten Landflächen und Gunststandorten für die Erzeugung von Strom in anderen Ländern einher.

Diese sind jedoch auch global betrachtet selten und deshalb effizient zu nutzen. Denn neben dem Verkehrssektor sind auch andere Sektoren auf erneuerbaren Strom angewiesen und zukünftig werden mit steigender Elektrifizierung noch weitere hinzukommen. Gleichzeitig ist in vielen Regionen mit günstigen Produktionsbedingungen für E-Fuels der Ausbau der erneuerbaren Energien noch nicht weit fortgeschritten oder ein großer Teil der Bevölkerung und Wirtschaft hat überhaupt noch keinen Zugang zu einer verlässlichen Stromversorgung. Weiterhin sollte beachtet werden, dass hier nur die Strombedarfe für die Wasserstoffproduktion, DAC und die Synthese aufgeführt sind. Zusätzlich werden große Mengen Süßwasser für die Produktion des Wasserstoffs gebraucht. Gerade in sonnenreichen Regionen wird dafür Meerwasser entsalzt werden müssen, was den Strombedarf zusätzlich erhöht. Daneben haben lokale Bevölkerungsgruppen Anspruch und Interessen an den scheinbar ungenutzten oder dünn besiedelten Flächen, die sich für die Stromproduktion eignen.

8 | Fazit: Energieeffizienz bleibt oberstes Gebot

E-Fuels sind auf absehbare Zeit unverzichtbar, um fossile Energieträger im Luftverkehr, in der Schifffahrt sowie in Teilen der chemischen Industrie zu ersetzen und damit den Klimaschutz in diesen Segmenten voranzubringen. Dabei sind und bleiben sie ineffizient, teuer und auf Jahrzehnte nur sehr begrenzt verfügbar. Deshalb müssen sie zielgerichtet produziert und eingesetzt werden. Denn jeder Liter E-Fuel, der trotz der Option des batterieelektrischen Antriebs im Straßenverkehr eingesetzt wird, fehlt in den Sektoren, wo es keine solchen Alternativen gibt.

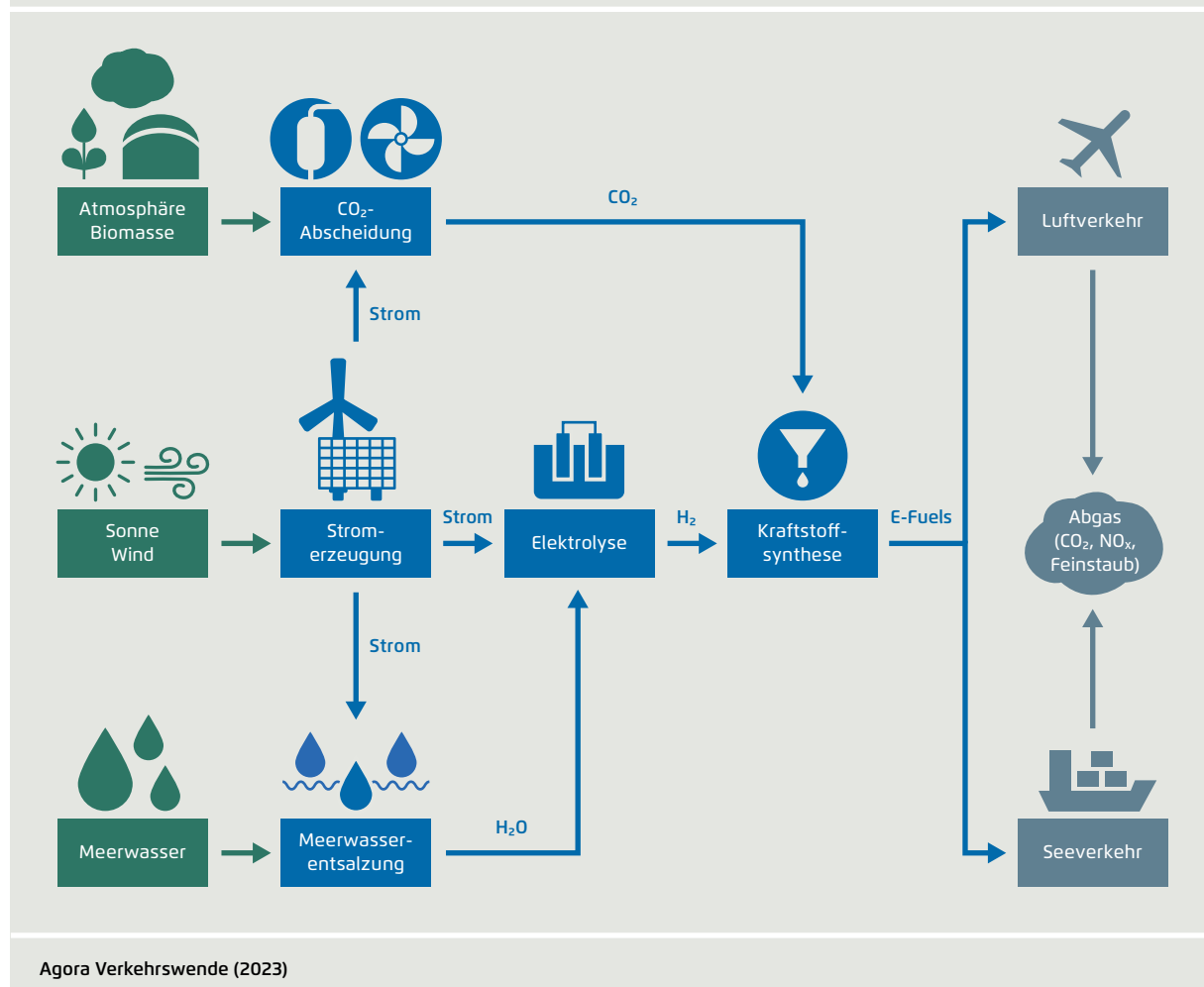
Um die Kosten zu senken und einen großtechnischen Einsatz zu ermöglichen ist ein ambitionierter Produktionshochlauf notwendig. Dabei sollte der Fokus von

Anfang an auf dem Luft- und Seeverkehr liegen, weil E-Fuels dort langfristig die einzige Klimaschutzoption sind. Entsprechend sollte auch das Produktspektrum der Produktionsanlagen ausgerichtet sein. Unvermeidbare Nebenprodukte können dann wiederum in den Teilen der chemischen Industrie eingesetzt werden, die auch weiterhin auf kohlenstoffbasierte Grundstoffe angewiesen sind.

Angesichts der geringen Menge an derzeit geplanten Produktionskapazitäten und sich erst jetzt konkretisierenden gesetzlichen Rahmenbedingungen für E-Fuels, sind die zu erwartenden weltweiten Mengen bis 2035 auch bei einem ambitionierten Hochlauf sehr gering. Dementsprechend sollten die produzier-

Gezielte E-Fuel-Produktion für Luft- und Seeverkehr

Abbildung 12



baren Mengen an E-Fuels in den kommenden Jahren nicht im Straßenverkehr eingesetzt werden.⁵⁷ Erst wenn ausreichende Mengen für die unverzichtbaren Anwendungen produziert werden können, wäre darüber hinaus ein partieller Einsatz von E-Fuels im Fahrzeugbestand volkswirtschaftlich tragbar. Auch mit sehr optimistischen Annahmen wird das aber nicht vor 2035 möglich sein.

Der Bau von Anlagen zur exklusiven Herstellung von E-Fuels für den Straßenverkehr – wie etwa die Anlage in Chile zur Produktion von E-Benzin – hat keine Perspektive in einem schlüssigen und ökonomisch effizienten Gesamtkonzept für Klimaneutralität, in dem die Ressourcen so eingesetzt werden, dass sie den größten Nutzen bringen. Die Elektromobilität und die dazugehörige Infrastruktur werden sich in den kommenden Jahren rasch entwickeln. Das zeigt sich bereits jetzt in der Industrie und in wichtigen Automobilmärkten. Die für eine Übergangsphase für die Klimaneutralität des Fahrzeugbestandes möglicherweise benötigten E-Fuels können über die Nebenprodukte bei der Produktion der E-Luft- und Schiffstreibstoffe bereitgestellt werden. Ein langfristig verlässlicher Bedarf an E-Fuels zeichnet sich nur in der Schifffahrt (E-Diesel, E-Methanol), im Luftverkehr (E-Kerosin) sowie in der chemischen Industrie (E-Naphtha, E-Methanol) ab. Investitionen in den Aufbau einer weltweiten E-Fuel-Produktion für den Straßenverkehr würden sich nicht auszahlen und rasch an Wert verlieren (*stranded assets*).

Beim Aufbau einer weltweiten E-Fuel-Produktion müssen die Interessen aller beteiligten Länder und Regionen fair berücksichtigt werden. Deutschland ist nicht das einzige Land, das auf E-Fuel-Importe angewiesen ist. Und in den Exportländern selbst werden ebenfalls erneuerbare Energien benötigt, sowohl im Stromsektor als auch im Verkehr und in allen weiteren energierelevanten Sektoren (Industrie, Wärme, Agrar).

Würde eine weltweite E-Fuel-Wirtschaft ungleiche Machtverhältnisse ausnutzen und fortsetzen, etwa in Anlehnung an die bestehenden Erdöl-Strukturen, drohen geopolitische Risiken und neoimperiale Konflikte. Deutschland sollte deshalb neben dem Import von E-Fuels weiter darauf setzen, seinen Energiebedarf mit effizienten Technologien wie Elektromobilität so gering wie möglich zu halten. Auch eine höhere Auslastung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen in Gunstregionen ändert nichts an der schlechten Energieeffizienz von Verbrennungsmotoren.

Politische Leitplanken für den gezielten Einsatz und schnellen Markthochlauf von E-Fuels sind bereits gesetzt (zum Beispiel Quoten in Luft- und Seeverkehr, Fördermechanismen, Nachhaltigkeitskriterien) und sollten weiter gestärkt beziehungsweise ausgebaut werden. Zusätzliche politische Anreize für E-Fuels im Straßenverkehr würden den Markthochlauf für die unverzichtbaren Anwendungen schwächen. Alle Kräfte – insbesondere der Bundesregierung, der EU-Kommission und der Industrie – sollten sich deshalb als nächstes darauf konzentrieren, möglichst schnell signifikante Mengen an E-Kerosin herzustellen und die Produktionskosten zu senken. Darüber hinaus sollten flankierende Maßnahmen in Forschung und Entwicklung zur weiteren Optimierung der E-Fuel-Produktionsverfahren sowie der Verfügbarmachung nachhaltiger CO₂-Quellen, insbesondere die Abscheidung aus der Atmosphäre, umgesetzt werden.

57 Die Bundesregierung hat in ihrem „Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung“ vom 28.03.2023 beschlossen, die rechtlichen Voraussetzungen für den frei zugänglichen Verkauf von E-Fuels an Tankstellen zu schaffen (Aufnahme der DIN EN 15940 in die 10. BImSchV). Aktuell dürfen E-Fuels nur bis zu einem Anteil von etwa 26 Prozent zu herkömmlichen Kraftstoffen beigemischt werden. Auf Grund der begrenzten Verfügbarkeit von E-Fuels dürfte dies jedoch zu keinen nennenswerten zusätzlichen CO₂-Einsparungen führen.

9 | Literaturverzeichnis

24auto.de (2023): Audi-Chef Marcus Duesmann macht Elektro-Ansage: „Unser Abschied vom Verbrenner steht fest“. URL: <https://www.24auto.de/news/audi-chef-marcus-duesmann-abschied-verbrenner-eu-e-fuels-elektroauto-zr-92168138.html>. Letzter Zugriff am 05.06.2023.

Acatech et al. (2017): „Sektorkopplung“ – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. Schriftenreihe Energiesystem der Zukunft.

Afful-Dadzie, A., Mallett, A., & Afful-Dadzie, E. (2020): The challenge of energy transition in the Global South: The case of electricity generation planning in Ghana. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 126. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109830.

AG Energiebilanzen e. V. (2021): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2019. URL: <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?wpv-jahresbereich-bilanz=2021-2030>. Letzter Zugriff am: 26.04.2023.

Agora Energiewende; Agora Industrie (2022): 12 Thesen zu Wasserstoff. URL: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/12-thesen-zu-wasserstoff-publikation/>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Agora Verkehrswende; Agora Energiewende (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. URL: <https://www.agora-energiewende.de/projekte/die-zukuenftigen-kosten-strombasierter-synthetischer-brennstoffe-1/>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Altenburg, T., Stamm, A., & Strohmaier, R. (2023): Green hydrogen – support for the just transition? URL: <https://www.idos-research.de/en/the-current-column/article/green-hydrogen-support-for-the-just-transition/>. Letzter Zugriff am: 01.06.2023.

Arcadia eFuels (2022): Arcadia eFuels announces its first eFuels plant location in Vordingborg, Denmark. URL: <https://arcadiaefuels.com/sunclass-airlines-intends-to-purchase-synthetic-jet-fuel-ekerosene-from-arcadia-efuels-3/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

argusmedia.com (2022): Repsol, Aramco develop e-fuels plant in Spain. URL: <https://www.argusmedia.com/en/news/2335341-repsol-aramco-develop-efuels-plant-in-spain>. Letzter Zugriff am: 03.04.2023.

Atmosfair (2023): Anlage. URL: <https://fairfuel.atmosfair.de/de/anlage-techn-details/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Bahadur, A.; Leifker, M.; Lincoln, S. (2018): Edles Metall – unwürdiger Abbau, Berlin: Brot für die Welt.

Backhouse, M. (2019): Green Grabbing. In: Brunner, Jan; Dobelmann, Anna; Kirst, Sarah; Prause Louisa (2021): Wörterbuch Land- und Ressourcenkonflikte. Bielefeld: BPB, S. 122–126.

Becattini, V.; Gabrielli, P.; Mazzotti, M. (2021): Role of Carbon Capture, Storage, and Utilization to Enable a Net-Zero-CO₂-Emissions Aviation Sector. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60 (18), S. 6848–6862. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c05392.

BHL; LBST (2022): Power-to-Liquids – A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA).

Biofuels Central (2023a): Nacero is Developing a World Scale Methanol to Jet Fuel Complex with TOPSOE Support using their MTJet Technology for Sustainable Aviation Fuel. URL: <https://biofuelscentral.com/nacero-developing-world-scale-methanol-to-jet-fuel-complex-with-topsoe-support-using-their-mtjet-technology-for-sustainable-aviation-fuel/>. Letzter Zugriff am: 13.04.2023.

Biofuels Central (2023b): Honeywell Introduces Uop Efining™ Technology for New Class of Sustainable Aviation Fuel. URL: <https://biofuelscentral.com/honeywell-introduces-uop-efining-technology-for-new-class-of-sustainable-aviation-fuel/>. Letzter Zugriff am: 22.08.2023.

Bogdanov, D.; Breyer, C. (2016): North-East Asian Super Grid for 100% renewable energy supply: optimal mix of energy technologies for electricity, gas and heat supply options. *Energy Conversion and Management*, 112, S. 176–190. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.01.019.

Bolinger, M.; Bolinger, G. (2022): *Land Requirements for Utility-Scale PV: An Empirical Up-date on Power and Energy Density. IEEE Journal of Photovoltaics, 12(2). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2021.3136805.*

Boston Consulting Group (2021): *Klimapfade 2.0: Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft.* URL: <https://bdi.eu/themenfelder/energie-und-klima/klimapfade>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

BP (2022): *bp Statistical Review of World Energy.* URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

BMUV (2021): *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Beschlossene Anpassungen der Treibhausgasminderungsquote (THG-Quote).* URL: <https://www.bmuv.de/media/beschlossene-anpassungen-der-treibhausgasminderungsquote-thg-quote>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Carbon Recycling International (2023a): *George Olah Renewable Methanol Plant: First Production of Fuel From CO₂ at Industrial Scale.* URL: <https://www.carbonrecycling.is/project-goplant>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Carbon Recycling International (2023b): *Commercial scale e-methanol production in Norway.* URL: <https://www.carbonrecycling.is/projects#finnfjord-emethanol>. Letzter Zugriff am: 21.08.2023.

Cision PR Newswire (2022a): *Fulcrum BioEnergy Successfully Produces First Ever Low-Carbon Fuel from Landfill Waste at its Sierra BioFuels Plant.* URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/fulcrum-bioenergy-successfully-produces-first-ever-low-carbon-fuel-from-landfill-waste-at-its-sierra-biofuels-plant-301707331.html>. Letzter Zugriff am: 01.06.2023.

Cision PR Newswire (2022b): *HIF Global beteiligt Bechtel, Siemens Energy und Topsoe an eFuels-Projekt in den USA.* URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/hif-global-beteiligt-bechtel-siemens-energy-und-topsoe-an-efuels-projekt-in-den-usa-301697411.html>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Climeworks (2023a): *Orca: the first large-scale plant.* URL: <https://climeworks.com/roadmap/orca>. Letzter Zugriff am: 01.06.2023.

Climeworks (2023b): *Mammoth: our newest facility.* URL: <https://climeworks.com/roadmap/mammoth>. Letzter Zugriff am: 01.06.2023.

Concrete Chemicals (2023): *Project.* URL: <https://www.concrete-chemicals.eu/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

DBFZ (2019): *Monitoring Biokraftstoffsektor.* URL: <https://www.dbfz.de/pressemediathek/publikationsreihen-des-dbfz/dbfz-reports/dbfz-report-nr-11/>. Letzter Zugriff: 05.06.2023.

DECHEMA (2021): *3. Roadmap des Kopernikus-Projektes „P2X“: Phase II – Technischer Anhang.*

DECHEMA (2023): *4. Roadmap des Kopernikus-Projektes P2X Phase II – Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien.*

dena (2021): *Pkw-Antriebe für die Zukunft: Ökonomische, ökologische und technische Effizienz im Vergleich. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi).*

dena (2022): *E-Kerosene for Commercial Aviation, From Green Hydrogen and CO₂ from Direct Air Capture – Volumes, Cost, Area Demand and Renewable Energy Competition in the United States and Europe from 2030 to 2050.* URL: <https://www.dena.de/newsroom/publikations-detailansicht/pub/studie-e-kerosene-for-commercial-aviation/>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Deutscher Bundestag (2022): *Osterpaket zum Ausbau erneuerbarer Energien beschlossen.* URL: <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2022/kw27-de-energie-902620>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

DLR; TUHH; JBV (2021): *Konzeptionelle und technische Ausgestaltung einer Entwicklungsplattform für Power-to-Liquid-Kraftstoffe – Abschlussbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).*

E4Tech (2021): *Decarbonisation potential of synthetic kerosene. Studie im Auftrag von Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.* URL: <https://open.overheid.nl/repository/ronl-bde5b558-6ba9-40b5-a428-c04d43e18d2a/1/pdf/bijlage-1-onderzoek-decarbonisation-potential-of-synthetic-kerosene.pdf>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Earth & Wire (2021): *On The Wire.* URL: <https://earthandwire.com/blog/consortium-unveils-plans-for-zero-emission-eastern-cape-e-methanol-plant>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Enlit (2022): *Chile – \$50 million for green hydrogen development.* URL: <https://www.enlit.world/hydrogen/chile-50-million-for-green-hydrogen-development/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Europäisches Parlament (2022): *ReFuelEU Aviation initiative: Sustainable aviation fuels and the fit for 55 package.* URL: [https://www.europarl.europa.eu/think-tank/de/document/EPRS_BRI\(2022\)698900](https://www.europarl.europa.eu/think-tank/de/document/EPRS_BRI(2022)698900). Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Europäisches Parlament (2023): *Fuel EU Maritime – Sustainable maritime fuels.* URL: <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-fuel-eu-maritime>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Europäische Kommission (2021): *2020 Annual Report from the European Commission on CO₂ Emissions from Maritime Transport.* URL: https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/commission-publishes-first-annual-eu-report-co2-emissions-maritime-transport-2020-05-25_en. Letzter Zugriff am: 02.06.2023.

European Energy (2022): *Siemens Energy secures electrolyzer order from European Energy for world's first large-scale e-Methanol project.* URL: <https://europeanenergy.com/2022/03/02/siemens-energy-secures-electrolyzer-order-from-european-energy-for-worlds-first-large-scale-e-methanol-project/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Eurostat (2023): *Electricity production capacities for renewables and wastes (MW).* URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_INF_EPCRW/default/table?lang=en. Letzter Zugriff am: 16.05.2023.

Eurostat (2023): *Supply, transformation and consumption of electricity (GWh).* URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_cb_e/default/table?lang=en. Letzter Zugriff am: 16.05.2023.

Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (01. 06 2019): *Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. Journal of Cleaner Production, 224, S. 957–980. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.03.086.*

Fast Company (2023): *This new U.S. factory plans to turn captured CO₂ into a million gallons of jet fuel annually.* URL: <https://www.fastcompany.com/90921721/twelve-factory-captured-co2-1-million-gallons-of-jet-fuel-sustainable-aviation-fuel>. Letzter Zugriff am: 21.08.2023.

Fraunhofer ISE; E4tech; Fraunhofer IPA (2018): *Studie IndWEde. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).* URL: <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Publikationen/studien/studie-indWEde.html>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Fraunhofer ISE (2022): *Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende.* URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/agri-photovoltaik-chance-fuer-landwirtschaft-und-energiewende.html>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Fuel Cell Works (2022): *ENERTRAG Plans Green Hydrogen Project in the Tacuarembó Region of Uruguay.* URL: <https://fuelcellworks.com/news/enertrag-plans-green-hydrogen-project-in-the-tacuarembó-region-of-uruguay/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Green Fuels Hamburg (2023): *Das Projekt.* URL: <https://www.arcadiaefuels.com/arcadia-efuels-receives-investment-for-ptx-facility-from-swen>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

HIF (2022): *HIF Global and its partners celebrate the first liters of synthetic fuels from Haru Oni, Chile.* URL: <https://hifglobal.com/wp-content/uploads/2022/12/HIF-Global-and-its-partners-celebrate-the-first-liters-of-synthetic-fuels-from-Haru-Oni-Chile.pdf>. Letzter Zugriff am: 22.08.2023.

HIF (2023a): *HIF Cabo Negro eFuels facility.* URL: <https://hifglobal.com/region/hif-chile/>. Letzter Zugriff am: 22.08.2023.

HIF (2023b): *HIF Global continues expansion and announces new eFuels project in Paysandú, Uruguay.* URL: <https://hifglobal.com/wp-content/uploads/2023/06/2023.06-HIF-Global-continues-expansion-with-new-project-in-Uruguay.pdf>. Letzter Zugriff am: 22.08.2023.

HIF (2023c): *HIF Tasmania eFuel Facility.* URL: <https://hifglobal.com/region/hif-asia-pacific/>. Letzter Zugriff am: 22.08.2023.

HIF (2023b): *HIF Global continues expansion and announces new eFuels project in Paysandú, Uruguay.* URL: <https://hifglobal.com/wp-content/uploads/2023/06/2023.06-HIF-Global-continues-expansion-with-new-project-in-Uruguay.pdf>. Letzter Zugriff am: 22.08.2023.

Houston Business Journal (2023): *Infinium developing Texas plants to produce net-zero heavy transport fuels.* URL: <https://www.bizjournals.com/houston/news/2023/02/17/infinium-texas-gulf-coast-electro-fuels-hydrogen.html>. Letzter Zugriff am: 04.04.2023.

HyPat (2022): *HYPAT Working Paper 01/2022. Hintergrundpapier zu nachhaltigem grünen Wasserstoff und Syntheseprodukten.* URL: https://hypat.de/hypat-wAssets/docs/new/publikationen/HyPAT_Working-Paper_01-2022_Hintergrundpapier_nachhaltiger_gruener_Wasserstoff_Syntheseprodukten.pdf. Letzter Zugriff am: 17.05.2023.

HyShift (2023): *HyShift. Making Sustainable Aviation happen. Together.* URL: <https://www.hyshift.org/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Iberdrola (2022): *Iberdrola and Foresa advance in their alliance to lead green methanol production in Spain.* URL: <https://www.iberdrola.com/press-room/news/detail/iberdrola-and-foresa-advance-in-their-alliance-to-lead-green-methanol-production-in-spain>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

icct (2018): *Bioenergy can solve some of our climate problems, but not all of them at once.* URL: <https://theicct.org/bioenergy-can-solve-some-of-our-climate-problems-but-not-all-of-them-at-once/>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

icct (2021): *Decarbonizing road transport by 2050: Zero-emission pathways for passenger vehicles.* URL: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/zevtc-decarbonizing-by-2050-Jul2021%E2%80%AF.pdf>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

icct (2022): *Fuel-cell hydrogen long-haul trucks in Europe: A total cost of ownership analysis.* URL: <https://theicct.org/publication/eu-hvs-fuels-evs-fuel-cell-hdvs-europe-sep22/>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

iea (2021): *Global Hydrogen Review: Assumptions annex.* URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/2ceb17b8-474f-4154-aab5-4d898f735c17/IEAGHRassumptions_final.pdf. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

iea (2022): *Global Hydrogen Review 2022.* URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

ifeu (2019): *CO₂-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland – Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit.* URL: <https://www.ifeu.de/publikation/co2-quellen-fuer-die-ptx-herstellung-in-deutschland-technologien-umweltwirkung-verfuegbarkeit/>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

ifeu (2020): *Verfügbarkeit und nachhaltige Bereitstellung von Biokraftstoffen nach Anhang IX Teil B (Biodiesel aus gebrauchtem Speiseöl und Tierfett).* URL: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/UCO_ifeu-Studie_final_28-10-20.pdf. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

ifeu (2022): CO₂-Opportunitätskosten von Biokraftstoffen in Deutschland. URL: <https://www.ifeu.de/publikation/co2-opportunitaetskosten-von-biokraftstoffen-in-deutschland/>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

ifeu; DLR; Joanneum Research (2020): Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA). URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/systemvergleich-speicherbarer-energietraeger-aus-erneuerbaren-energien>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Ineratec (2022): E-Fuel Pionieranlage in Deutschland. URL: <https://www.ineratec.de/de/news/e-fuel-pionier-anlage-deutschland>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Infinium (2022): Infinium™ Enters into Strategic Alliance with Denbury for Ultra-Low Carbon Fuels Projects in Texas, Continuing Development Momentum. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/infinium-enters-into-strategic-alliance-with-denbury-for-ultra-low-carbon-fuels-projects-in-texas-continuing-development-momentum-301489124.html>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

IRENA (2022): World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Jeswani, H. K.; Chilvers, A.; Azapagic, A. (2020): Environmental sustainability of biofuels: a review. *Proceedings of the Royal Society A*, 476. DOI: 10.1098/rspa.2020.0351.

Jones, E.; Qadir, M.; van Vliet, M. T.; Smakhtin, V.; Kang, S.-m. (2019): The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of The Total Environment*, 657, S. 1343–1356. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.12.076.

Jones, S.; Zhu, Y. (2009): Techno-economic Analysis for the Conversion of Lignocellulosic Biomass to Gasoline via the Methanol-to-Gasoline (MTG) Process. URL: <https://www.osti.gov/biblio/962846>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

KEROSyN100 (31. März 2023): KEROSyN100: Die Defossilisierung der Luftfahrt. URL: <https://www.kerosyn100.de/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Kuckshinrichs, W.; Ketelaer, T.; Koj, J. C. (2017): Economic Analysis of Improved Alkaline Water Electrolysis. *Frontiers in Energy Research*, 5. DOI:10.3389/fenrg.2017.00001.

Lee, D.S. et al. (2021): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834.

Liquid Wind (2023): L2022 Annual Report. URL: https://www.liquidwind.se/s/Liquid-Wind_Annual-Report-2022_Digital.pdf. Letzter Zugriff am: 22.08.2023.

Lonis, F.; Tola, V.; Cau, G. (2021): Assessment of integrated energy systems for the production and use of renewable methanol by water electrolysis and CO₂ hydrogenation. *Fuel*, 285. DOI:10.1016/j.fuel.2020.119160.

Merkur.de (2023): „Ineffizient, teuer“: Viele Autobosse halten E-Fuels für Luftnummer – VW und BMW sehen das ganz anders. URL: <https://www.merkur.de/wirtschaft/e-fuels-synthetischer-kraftstoff-zukunft-chef-bmw-porsche-audi-stellantis-zr-92263211.html>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

motor1.com (2023): VW-Boss nennt E-Fuel-Diskussion „unnötigen Lärm“. URL: <https://de.motor1.com/news/661931/volkswagen-chef-efuel-unnoetige-diskussion/>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Nordic Electrofuel (2023): Plants and projects. URL: <https://nordicelectrofuel.no/what-we-do/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Norsk E-Fuel (2023): Our technology. URL: <https://www.norsk-e-fuel.com/technology>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

NRW.Energy4Climate GmbH (2023): Nachhaltiger Einsatz von Biomasse – Die Rolle von Biomasse in der Energiewende und in einer klimaneutralen Industrie. URL: <https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Industrie-Produktion/Der-nachhaltige-Einsatz-von-Biomasse-cr-nrwenergy4climate.pdf>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Offshore Energy (2023): *Técnicas Reunidas unites with Cetaer for development of e-methanol plant.* URL: <https://www.offshore-energy.biz/tecnicas-reunidas-unites-with-cetaer-for-development-of-e-methanol-plant/>. Letzter Zugriff am: 17.04.2023.

Öko-Institut (2019): *Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland.* URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/PtX-Hintergrundpapier.pdf>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Öko-Institut (2021): *E-fuels versus DACCS. Studie im Auftrag von Transport & Environment (T&E).* URL: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2021_08_TE_study_efu-els_DACCS.pdf. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Ørsted (2022): *Green Fuels for Denmark receives IPCEI status.* URL: <https://orsted.com/en/media/newsroom/news/2022/07/20220715544411>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Ørsted (2023a): *Ørsted opens a new era in green shipping by breaking ground on Europe's largest e-methanol project.* URL: <https://orsted.com/en/media/newsroom/news/2023/05/13682622>. Letzter Zugriff am: 22.08.2023.

Ørsted (2023b): *Ørsted and Maersk sign landmark green fuels agreement, as Ørsted enters the U.S. Power-to-X market.* URL: <https://us.orsted.com/news-archive/2022/03/orsted-and-maersk-sign-landmark-green-fuels-agreement>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Oxford Business Group (2023): *GTL production ramps up in Qatar.* URL: <https://oxfordbusinessgroup.com/reports/qatar/2015-report/economy/gtl-production-ramps-up-in-qatar>. Letzter Zugriff am: 28.04.2023.

Pacific Institute (2023): *World Water Conflict Map.* URL: <https://www.worldwater.org/conflict/map/>. Letzter Zugriff am: 01.06.2023.

P2X Europe (2022): *New Power-to-Liquid plant at H&R's Hamburg site produces alternatives to fossil raw materials.* URL: <https://www.p2x-europe.com/news/detail/new-power-to-liquid-plant-at-hrs-hamburg-site-produces-alternatives-to-fossil-raw-materials/>. Letzter Zugriff am: 03.04.2023.

P2X Europe (2023): *Greenalia and P2X-Europe join forces to develop eFuel production project in Galicia.* URL: <https://www.p2x-europe.com/news/detail/greenalia-and-p2x-europe-join-forces-to-develop-efuel-production-project-in-galicia/>. Letzter Zugriff am: 21.08.2023.

Power to Methanol Antwerp BV (2023): *Latest News.* URL: <https://powertomethanolantwerp.com/news>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut (2021): *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann (Langfassung). Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.* URL: <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045-langfassung/>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

PtX Hub (2022): *PtX. Sustainability: Dimensions and Concerns.* URL: <https://ptx-hub.org/ptx-sustainability/>. Letzter Zugriff am: 17.05.2023.

Rat der Europäischen Union (2023): *Erneuerbare-Energien-Richtlinie: Rat und Parlament erzielen vorläufige Einigung.* URL: <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/03/30/council-and-parliament-reach-deal-on-renewable-energy-directive/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Renewables Ninja (2022a): *Solar PV.* URL: <https://www.renewables.ninja/downloads>. Letzter Zugriff am: 17.05.2023.

Renewables Ninja (2022b): *Wind.* URL: <https://www.renewables.ninja/downloads>. Letzter Zugriff am: 17.05.2023.

Renewables Now (2022): *European Energy plans 120-MW electrolyser for Power-to-X project in Aalborg.* URL: <https://renewablesnow.com/news/european-energy-plans-120-mw-electrolyser-for-power-to-x-project-in-aalborg-778855/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Reuters (25. April 2022): *Egypt to work with UAE's Masdar to make green hydrogen.* URL: <https://www.reuters.com/world/middle-east/egypt-work-with-uaes-masdar-make-green-hydrogen-2022-04-24/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Reuze (2023): *What is Reuze?* URL: <https://www.reuze.eu/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Sasol (2006): *Oryx GTL inauguration*. URL: <https://www.sasol.com/media-centre/media-releases/oryx-gtl-inauguration>. Letzter Zugriff am: 28.04.2023.

Schär, D. (2022): *Katalysatoren für nachhaltige Flugzeugtreibstoffe*. URL: <https://www.chemanager-online.com/news/katalysatoren-fuer-nachhaltige-flugzeugtreibstoffe>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Schemme, S.; Breuer, J. L.; Köller, M.; Meschede, S.; Walman, F.; Samsun, R. C.; Peters, R.; Stoltene, D. (2020): *H₂-based synthetic fuels – A techno-economic comparison of alcohol, ether and hydrocarbon production. International Journal on Hydrogen Energy*, 45(8), S. 5395–5414. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.028.

Sherwin, E.D. (2021): *Electrofuel Synthesis from Variable Renewable Electricity: An Optimization-Based Techno-Economic Analysis*. *Environmental Science & Technology*, 55 (11), S. 7583–7594. DOI: 10.1021/acs.est.0c07955.

Solarserver (2023): Deutsche Bahn ersetzt Diesel durch Biokraftstoff HVO. URL: <https://www.solarserver.de/2023/01/04/deutsche-bahn-ersetzt-diesel-durch-biokraftstoff-hvo/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Statista (2023): *Nettostromverbrauch in Deutschland in den Jahren 1991 bis 2021*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164149/umfrage/netto-stromverbrauch-in-deutschland-seit-1999/>. Letzter Zugriff am: 26.04.2023.

Synkero (2023): Synkero develops a synthetic kerosene facility in the Port of Amsterdam. URL: <https://synkero.com/#about-us>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

The Navigator Company (2022): *The Navigator Company and P2X Europe have signed a Memorandum of Understanding to create a unique Joint Venture in Portugal to produce green, non-fossil synthetic eFuels.* URL: <https://renewable-carbon.eu/news/the-navigator-company-and-p2x-europe-have-signed-a-memorandum-of-understanding-to-create-a-unique-joint-venture-in-portugal-to-produce-green-non-fossil-synthetic-efuels/>.
Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Transport & Environment (2023): *EU beschließt weltweit größte Verordnung für grüne Kraftstoffe in der Luftfahrt.*
URL: <https://www.transportenvironment.org/discover/eu-beschliesst-weltweit-groeste-verordnung-fur-gru-ne-kraftstoffe-in-der-luftfahrt/>. Letzter Zugriff am: 27.04.2023.

Ueckerdt, F.; Bauer, C.; Dirnauichner, A.; Everall, J.; Sacchi, R.; Luderer, G. (2021): Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 11, S. 384–393. DOI: 10.1038/s41558-021-01032-7.

U.S. Energy Information Administration (2023): *Jet Fuel Consumption (Mmt) Germany*. URL: <https://www.eia.gov/international/data/world/petroleum-and-other-liquids/monthly-petroleum-and-other-liquids-production?pd=5&p=0000000000g&u=1&f=A&v=column&a=-&i=none&vo=value&t=C&g=none&l=249--55&s=315532800000&e=1640995200000&ev=false&>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

U.S. Energy Information Administration (2023): *Petroleum and other liquids*. URL: <https://www.eia.gov/international/data/world/petroleum-and-other-liquids/monthly-petroleum-and-other-liquids-production?pd=5&p=00000000014&u=1&f=A&v=colum-n&a=-&i=none&vo=value&t=G&g=00000000000000000000000000000000&l=170-0268001c153k-g614808a24sg40e1000>. Letzter Zugriff am: 26.04.2023.

Ueckerdt, F., & Odenweller, A. (2023): E-Fuels – Aktueller Stand und Projektionen. Potsdam: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. URL: <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/e-fuels-wahrscheinlich-noch-lange-knapp-pik-analyse-papier>. Letzter Zugriff: 05.06.2023.

Vereinte Nationen (2023): *The Energy Progress Report: Tracking SDG 7*. URL: <https://trackingsdg7.esmap.org/downloads>. Letzter Zugriff am: 07.06.2023.

Viebahn, P.; Scholz, A.; Zelt, O. (2019): *The Potential Role of Direct Air Capture in the German Energy Research Program – Results from a Multi-Dimensional Analysis. Energies, 12 (18). DOI:10.3390/en12183443.*

Wacker (2023): *RHYME Bavaria*. URL: <https://www.wacker.com/cms/de-de/about-wacker/research-and-development/rhyme-bavaria/detail.html>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

WEF (2020): *Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation*. URL: <https://www.weforum.org/reports/clean-skies-for-tomorrow-sustainable-aviation-fuels-as-a-pathway-to-net-zero-aviation/>. Letzter Zugriff am: 05.06.2023.

Zenid (2023): *Sustainable aviation fuel made from air. Fully circular*. URL: <https://zenidfuel.com/>. Letzter Zugriff am: 31.03.2023.

Zero (2023): *Zero and Global E&C sign pioneering agreement*. URL: <https://www.zero.co/news-media/zero-and-global-e-and-c-sign-pioneering-agreement>. Letzter Zugriff am: 11.04.2023.

10 | Anhang

Angekündigte Projekte zur E-Fuels-Produktion (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Tabelle 2

Projektname	beteiligte Unternehmen ^a	geplante Kapazität (t/a) ^b	Status ^c	Quelle
–	Ineratec	3.500 (2024)	in Bau	Ineratec (2022)
–	P2X Europe, The Navigator Company	40.000 (2026)	in Planung	The Navigator Company (2022)
Alpha Plant	Climeworks, Lux-Airport, Norsk E-Fuel, Paul Worth SMS Group, Sunfire, Valinor	10.000 (2024) 20.000 (2026) 80.000 (2029)	in Planung	Norsk E-Fuel (2023)
Bilbao Decarbonization Hub	Enagas, EVE, Repsol	2.100 (2024)	in Planung	argusmedia.com (2022)
Brazoria electrofuels	Denbury, Infinium	Keine Angaben	in Planung	Infinium (2022)
Breogán Project	Greenalia, P2X Europe	20.000 (k. A.)	in Planung	P2X Europe (2023)
Concrete Chemicals	Cemex, Enertrag, Sasol	7.600 ^d (2027) 30.500 ^d (2030)	in Planung	Concrete Chemicals (2023)
Corpus Christi electrofuels	Amazon, Infinium	Keine Angaben	in Planung	Houston Business Journal (2023)
E-Fuel 1	Nordic Electrofuel	8.000 (2026)	in Planung	Nordic Electrofuel (2023)
Fairfuel	Atmosfair	350 (2022)	in Betrieb	Atmosfair (2023)
Green Fuels Hamburg	Airbus, Siemens Energy, Uniper	10.000 ^d (2026)	in Planung	Green Fuels Hamburg (2023)
HyShiFT	Enertrag, Hydregen, Linde, Sasol	Keine Angaben	in Planung	HyShift (2023)
Moses Lake E-Jet Plant	Twelve	121 (2024)	in Bau	FastCompany (2023)
NextGate	H&R Group, Mabanaft, P2X Europe	350 (2022)	in Betrieb	P2X Europe (2022)
Plant Zero.1	Global E&C, Zero	Keine Angaben	in Planung	Zero (2023)
Reuze	Engie, Infinium	100.000 (2026)	in Planung	Reuze (2023)
SynKero	City of Amsterdam, KLM, Port of Amsterdam, Royal Schiphol Group, SkyNRG, SynKero	50.000 ^d (2027)	in Planung	Synkero (2023)
Vordingborg eFuels plant	Arcadia eFuels	80.000 (2026)	in Planung	Arcadia eFuels (2022)
Zenid One	Climeworks, SkyNRG, Uniper, Zenid	Keine Angaben	in Planung	Zenid (2023)

a Aufgelistete Unternehmen wurden in öffentlicher Kommunikation im Zusammenhang mit den Projekten genannt, dies bedeutet keine finanzielle Beteiligung am Projekt; in alphabetischer Reihenfolge.

b Jeweils geplante Gesamtkapazität; Jahresangabe bezieht sich auf angekündigte Inbetriebnahme beziehungsweise Erweiterung.

c Entsprechend der öffentlichen Ankündigungen auf dem Stand August 2023; „in Planung“ umfasst alle Projektphasen von Machbarkeitsuntersuchungen bis zum konkreten Engineering.

d Angabe bezieht sich nur auf E-Kerosin.

Angekündigte Projekte zur E-Fuels-Produktion über die Methanol Route
(ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Tabelle 3

Projektname	beteiligte Unternehmen ^a	geplante Kapazität (t/a) ^b	Status ^c	Quelle
Aabenraa / Kassø	European Energy	10.000 (2023)	in Planung	European Energy (2022)
Antofagasta Mining Energy Renewable (AMER)	Air Liquide	60.000 (2025)	in Planung	Enlit (2022)
Finnfjord e-methanol plant	Carbon Recycling International, Finnfjord, Statkraft	100.000 (k. A.)	in Planung	Carbon Recycling International (2023)
FlagshipONE	Liquid Wind AB, Ørsted	50.000 (2025)	in Bau	Ørsted (2023a)
FlagshipTWO	Liquid Wind AB, Sundsvall Energi	100.000 (2026)	in Planung	Liquid Wind (2023)
FlagshipTHREE	Liquid Wind AB, Umeå Energi	100.000 (2027)	in Planung	Liquid Wind (2023)
Geen UMI	Foresa, Iberdrola	2.900 (2025)	in Planung	Iberdrola (2022)
George Olah	Carbon Recycling International	4.000 (2012)	in Betrieb	Carbon Recycling International (2023)
Green Fuels for Denmark Phase 2a/2b	Everfuel, Haldor Topsøe, Nel, Ørsted	50.000 (2025) 100.000 (2027)	in Planung	Ørsted (2022)
Haru Oni	Empresas Gasco, ENAP, enel, ExxonMobil, HIF, Porsche, Siemens Energy	350 (2022) 100 ^d (2022)	in Betrieb	HIF (2022)
HIF Cabo Negro eFuels facility	HIF	41.250 ^d (k. A.)	in Planung	HIF (2023a)
HIF Matagorda eFuels facility	Bechtel Energy, HIF, Siemens Energy, Topsoe	1.400.000 (2027) 562.500 ^d (2027) 475.700 ^e (2030)	in Planung	Cision PR Newswire (2022b) Biofuels Central (2023b)
HIF Paysandu	HIF	192.000 ^d (k. A.)	in Planung	HIF (2023b)
HIF Tasmania eFuel facility	HIF, Technip Energies	75.000 ^d (2027)	in Planung	HIF (2023c)
Humansdorp	Earth and Wire, Enertrag, 24 Solutions	120.000 (2027)	N. A.	Earth & Wire (2021)
KeroSyn100	CAC, Raffinerie Heide	Keine Angaben	in Planung	KEROSYN100 (2023)
Masdar Hassan Allam Utilities E-Methanol	Hassan Allam Utilities, Masdar	100.000 (2026)	N. A.	Reuters (2022)
Power-to-X project in the Gulf Coast	Maersk, Ørsted	300.000 (2025)	in Planung	Ørsted (2023b)
RHYME Bavaria	Wacker	15.000 (2025)	in Planung	Wacker (2023)

Projektname	beteiligte Unternehmen ^a	geplante Kapazität (t/a) ^b	Status ^c	Quelle
Tambor Green Hydrogen Hub	Enertrag, SEG Ingeniería	Keine Angaben	in Planung	Fuel Cell Works (2022)
Nascar	Cetaer, Técnicas Reunidas	37.000 (2026)	in Planung	Offshore Energy (2023)

- a Aufgelistete Unternehmen wurden in öffentlicher Kommunikation im Zusammenhang mit den Projekten genannt, dies bedeutet keine finanzielle Beteiligung am Projekt; in alphabetischer Reihenfolge.
- b Jeweils geplante Gesamtkapazität; Jahresangabe bezieht sich auf angekündigte Inbetriebnahme beziehungsweise Erweiterung.
- c Entsprechend der öffentlichen Ankündigungen auf dem Stand August 2023; „in Planung“ umfasst alle Projektphasen von Machbarkeitsuntersuchungen bis zum konkreten Engineering.
- d Anteil E-Benzin.
- e Anteil E-Kerosin.

Agora Verkehrswende (2023)

Annahmen zur Berechnung der Flächen- und Energiebedarfe zur Produktion von E-Kerosin über die Fischer-Tropsch Route, E-Methanol und E-Benzin über die Methanol-to-Gasoline Route (Bezugsjahr 2030 soweit entsprechenden Daten vorhanden) Tabelle 4

Prozessschritt	Parameter	Einheit	Wert	Quelle
Fischer-Tropsch Synthese	H ₂ -Bedarf	kg_H ₂ /kg_E-Kerosin	0,74	DLR; TUHH; JBV (2021)
	CO ₂ -Bedarf	kg_CO ₂ /kg_E-Kerosin	5,20	DLR; TUHH; JBV (2021)
	Strombedarf	kWh_el/kg_FT-Produkte	0,035	DECHEMA (2021)
	Naphtha-Nebenproduktion	kg_Naphtha/kg_Kerosin	0,17	DLR; TUHH; JBV (2021)
	Diesel- Nebenproduktion	kg_Diesel/kg_Kerosin	0,49	DLR; TUHH; JBV (2021)
Methanol-Synthese	H ₂ -Bedarf	kg_H ₂ /kg_E-Methanol	0,20	Lonis et al. (2021)
	CO ₂ -Bedarf	kg_CO ₂ /kg_E-Methanol	1,42	Lonis et al. (2021)
	Strombedarf	kWh_el/kg_E-Methanol	0,252	Lonis et al. (2021)
Methanol-to-Gasoline Prozess	H ₂ -Bedarf	kg_H ₂ /kg_E-Benzin	2,87	Schemme, et al. (2020)
	CO ₂ -Bedarf	kg_CO ₂ /kg_E-Benzin	0,40	Schemme, et al. (2020)
	Strombedarf	kWh_el/kg_E-Benzin	0,214	Jones & Zhu, (2009)
Elektrolyse	Strombedarf	kWh_el/kg_H ₂	48,3	IEA (2022)
	Wasserbedarf	kg_Wasser/kg_H ₂	10,11	Kuckshinrichs et al. (2017)
DAC	Strombedarf	kWh_el/t_CO ₂	225	Fasihi et. al (2019)
	Flächenbedarf	m ² /(t_CO ₂ a)	0,1	Viebahn et al. (2019)
PV-Anlagen (single axis, ø Europa)	Volllaststunden	h/a	1260	Renewables Ninja (2022a)
	Flächenertrag	MW/km ²	108	Bolinger & Bolinger (2022)
PV-Anlagen (single axis, Gunstregion)	Volllaststunden	h/a	2.287	Renewables Ninja (2022a)
	Flächenertrag	MW/km ²	43,2	Bolinger & Bolinger (2022)
Onshore WEA (ø Deutschland)	Volllaststunden	h/a	2.086	Renewables Ninja (2022b)
	Flächenertrag ^a	MW/km ²	840	Bogdanov & Breyer (2016)
Onshore WEA (Gunstregion)	Volllaststunden	h/a	5.137	Renewables Ninja (2022b)
	Flächenertrag ^a	MW/km ²	840	Bogdanov & Breyer (2016)
	Flächenertrag ^b	MW/km ²	8,4	Bogdanov & Breyer (2016)
Onshore WEA (Deutsche Nordsee)	Volllaststunden	h/a	3.606	Renewables Ninja (2022b)

a Nettoflächenbedarf für Windenergieanlage, Fundament und Zufahrt berücksichtigt

b Bruttoflächenbedarf für Windenergieanlage, berücksichtigt auch den Abstand zwischen den Anlagen um Verschattungseffekte zu vermeiden.

Publikationen von Agora Verkehrswende

Kosten der Mobilität

Zahlen und Fakten zu den Preisen im Straßen- und Schienenverkehr sowie deren Bedeutung für die Gesellschaft und den Klimaschutz

Towards Decarbonising Transport 2023

A Stocktake on Sectoral Ambition in the G20

Leapfrogging to Sustainable Transport in Africa

Twelve Insights into the Continent's Sector Transformation

Gesteuertes Laden

Warum es sich lohnt, beim Laden von Elektrofahrzeugen auf Stromangebot und Netzauslastung zu achten

Vorteil für Vorreiter

Wie sich Marktentwicklungen und Elektrifizierungsstrategien der Automobilhersteller auf deren Gewinnaussichten auswirken

Mobilitätsoffensive für das Land

Wie Kommunen mit flexiblen Kleinbussen den ÖPNV von morgen gestalten können

Unternehmensmobilität nachhaltig gestalten

Handlungsempfehlungen für mehr Klimaschutz und Effizienz im Flottenmanagement und auf Arbeitswegen

Die Bundesverkehrswegeplanung schleunigst modernisieren

Übersicht des Entstehungsprozesses des Bundesverkehrswegeplans 2030 und der Vorschläge für eine klimagerechte Reform

Vom rasenden Stillstand zum versprochenen Fortschritt?

Zwischenbilanz der Klimapolitik im Verkehr nach einem Jahr Ampelkoalition mit Empfehlungen für einen Kurs auf Klimaneutralität, Wirtschaftlichkeit und soziale Gerechtigkeit

Geschäftsmodell Verbrennungsmotor in Zeiten der Elektromobilität

Studie von Agora Verkehrswende und BCG

Kapital für den Wandel der Automobilindustrie

Wie Investoren und Banken eine Führungsrolle beim Erreichen der Pariser Klimaziele im Automobilsektor übernehmen können

Linienbedarfsverkehr auf dem Land

Perspektiven für den öffentlichen Verkehr im ländlichen Raum durch flexible Kleinbussysteme

Wie weit ist die deutsche Automobilindustrie auf dem Weg nach Paris?

Analyse der Klimaziele großer Hersteller (Volkswagen, BMW, Daimler) und Zulieferer (Bosch, Continental, ZF)

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-verkehrswende.de

Agora Verkehrswende ist ein Thinktank für klimaneutrale Mobilität mit Sitz in Berlin. Im Dialog mit Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft setzt sich die überparteiliche und gemeinnützige Organisation dafür ein, die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor auf null zu senken. Dafür entwickelt das Team wissenschaftlich fundierte Analysen, Strategien und Lösungsvorschläge.

Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-verkehrswende.de
info@agora-verkehrswende.de

