

Diskussionsbeitrag

Eine kritische Diskussion der beschlossenen Maßnahmen zur E-Fuel-Förderung im Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung der Bundesregierung vom 28.3.2023

Autorinnen und Autoren:

Martin Wietschel, Patrick Plötz, Elisabeth Dütschke, Felix Neuner,
Josephine Tröger und Till Gnann
(Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI,
Karlsruhe)

Impressum

Diskussionsbeitrag

Eine kritische Diskussion der beschlossenen Maßnahmen zur E-Fuel-Förderung im Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung der Bundesregierung vom 28.3.2023

Autorinnen und Autoren

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI:

Martin Wietschel, martin.wietschel@isi.fraunhofer.de;

Patrick Plötz, patrick.plötz@isi.fraunhofer.de;

Elisabeth Dütschke, elisabeth.duetschke@isi.fraunhofer.de;

Felix Neuner, felix.neuner@isi.fraunhofer.de

Josephine Tröger, josephine.troeger@isi.fraunhofer.de

Till Gnann, till.gnann@isi.fraunhofer.de

Zitierempfehlung

Wietschel, M.; Plötz, P.; Dütschke, E.; Neuner, F.; Tröger, J.; Gnann, T. (2023): Diskussionsbeitrag - Eine kritische Diskussion der beschlossenen Maßnahmen zur E-Fuel-Förderung im Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung der Bundesregierung vom 28.3.2023. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

Veröffentlicht

April, 2023

Kontakt

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe

Martin Wietschel, martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr.

Inhaltsverzeichnis

1	Was wurde im Modernisierungspaket zu E-Fuels beschlossen?.....	4
2	Was ist die Zielrichtung des vorliegenden Diskussionspapiers?	4
3	Warum ist die künftige Verfügbarkeit von E-Fuels für den Straßenverkehr stark begrenzt?	4
4	Was spricht aus wirtschaftlichen Gründen gegen den Einsatz von E- Fuels bei Pkw und Lkw?	6
5	Welche ökologischen Herausforderungen stellen sich bei E-Fuels?	7
6	Warum trägt der kurzfristige Einsatz von E-Fuels im Straßenverkehr nicht zur Technologieoffenheit bei?	8
7	Warum sollte der Einsatz von E-Fuels in Entwicklungs- und Schwellenländern nicht gefördert werden?	8
8	Warum kann die Förderung von E-Fuels einen negativen Einfluss auf die Verkehrswende haben?	9
9	Fazit	10
10	Anmerkungen und Quellen	11

1 Was wurde im Modernisierungspaket zu E-Fuels beschlossen?

Das Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung der Bundesregierung vom 28.3.2023 beschäftigt sich vergleichsweise ausführlich mit dem Thema E-Fuels, womit sie einen recht prominenten Stellenwert erhalten. Unter klimafreundlichen E-Fuels werden üblicherweise synthetische Kraftstoffe auf der Basis erneuerbarer Stromproduktion oder Biomasse verstanden, wobei im Modernisierungspakt hierzu keine näheren Angaben gemacht werden. E-Fuels wird im Modernisierungspaket zur Erreichung der Klimaneutralität im Verkehr eine wichtige Rolle zugesprochen. Ein Hochlauf der Produktion und eine Nutzung soll kurzfristig durch verschiedene Maßnahmen angereizt werden. Dafür sollen rechtliche und administrative Regelungen, die aktuell einer Ausweitung der Nutzung entgegenstehen, beseitigt werden. E-Fuels sollen zukünftig an Tankstellen verkauft werden können. Ein Fahrplan für den Hochlauf synthetischer und klimaneutraler Kraftstoffe soll im Dialog mit dem Mineralölhandel, den Automobilherstellern und Importeuren entwickelt werden und die Forschung für die technische Weiterentwicklung und die Massenproduktion gefördert werden. Es wird im Modernisierungspaket darauf verwiesen, dass sich die Bundesregierung mit Erfolg auf europäischer Ebene dafür eingesetzt hat, dass Fahrzeuge, die ausschließlich mit E-Fuels betankt werden können, auch nach 2035 in der Europäischen Union zugelassen werden können (Aufhebung des sogenannten Verbrennerverbots außerhalb der bestehenden CO₂-Flottengrenzwerte).

2 Was ist die Zielrichtung des vorliegenden Diskussionspapiers?

Das Modernisierungspaket soll klimafreundliche E-Fuels insbesondere auch bei Straßenfahrzeugen fördern und strebt einen kurzfristigen Markthochlauf an. Aus wissenschaftlicher Sicht sehen wir den Einsatz von E-Fuels im Straßenverkehr aus unterschiedlichen Perspektiven eher kritisch und möchten mit dem vorliegenden Papier zur kontroversen Diskussion aus der Perspektive der Wissenschaft und Forschung über E-Fuels beitragen. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich dabei auf E-Fuels auf der Basis von erneuerbarem Strom.

3 Warum ist die künftige Verfügbarkeit von E-Fuels für den Straßenverkehr stark begrenzt?

Biomassekraftstoffe, die üblicherweise ebenfalls als klimaneutral gewertet werden, werden heute bereits in nennenswerten Umfang im Straßenverkehr meist durch Beimischung zu fossilen Kraftstoffen eingesetzt. Sie stehen aber wegen einer ganzen Reihe an negativen Umweltauswirkungen bei einigen der Anbau- und Produktionspfade in der Kritik, insbesondere konventionelle Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermitteln. Ihnen wird teilweise sogar eine negative Auswirkung auf die Klimabilanz im Vergleich zur fossilen Referenz bescheinigt [1]. Im Modernisierungspaket wird auch darauf hingewiesen, kritische biogene Kraftstoffe möglichst auszuschließen. Andere Biokraftstoffe wie sog. fortschrittliche Biokraftstoffe aus Abfall- und Reststoffen oder Biokraftstoffe aus Alt Speiseöl und tierischen Fetten wiederum werden positiver bewertet und ihre Nutzung sollte deshalb

gefördert werden. Allerdings ist das Potenzial an nachhaltiger Biomasse, welches Deutschland zur Verfügung steht, auf rund 10% bis 14% der heutigen gesamten Primärenergiebedarfs von Deutschland beschränkt [2]. Biomasse wird auch in anderen Sektoren wie der Wärmeerzeugung oder der Industrie benötigt, und es ist fraglich, ob sie künftig tatsächlich im größeren Umfang im Straßenverkehr eingesetzt werden sollte. Sogenannte Systemstudien, die sich mit dem gesamten treibhausgasneutralen Energiesystem auseinandersetzen, ordnen die begrenzten nachhaltigen Biomassepotenziale aus Wirtschaftlichkeitsgründen eher anderen Sektoren zu [3].

Somit konzentriert sich die Diskussion bei großen Mengen an E-Fuels zunehmend auf den Produktionspfad auf der Basis von Strom. Hierbei wird der Strom erst in Wasserstoff und dann unter CO₂-Zugabe in synthetische Produkte umgewandelt. Diese können direkt stofflich genutzt werden, z.B. in der chemischen Industrie, oder energetisch. Bei einer energetischen Nutzung werden sie auch als E-Fuels (=Elektrisch-gewonnene synthetische Brenn- und Kraftstoffe) bezeichnet.

Was in der Wissenschaft derzeit übereinstimmend gesehen wird, ist, dass zur Erreichung von ambitionierten Klimaschutzziele künftig große Mengen an treibhausgasfrei oder -arm hergestelltem Wasserstoff und synthetischen Brenn- und Kraftstoffen benötigt werden. 2050 werden dies je nach Studie und Szenario 4 bis 11% der weltweiten Endenergienachfrage abdecken [4]. Es gibt verschiedene Produktionsrouten zur Herstellung dieses Wasserstoffes, aber zumindest mittel- und langfristig gehen die meisten Studien von einer Dominanz von grünem Wasserstoff aus, der auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellt wird. Auf diesen beziehen sich auch die folgenden Ausführungen.

Der Aufbau, der für die Bedarfsdeckung notwendigen Erneuerbaren Stromproduktion, der Elektrolysekapazitäten, Wasserentsalzungsanlagen und der Transportinfrastrukturen und bei synthetischen Kraftstoffen zusätzlich die notwendige Abscheidung von CO₂ aus der Luft stehen noch ganz am Anfang. Unterstellt man einen Anteil von grünem Wasserstoff und dessen Syntheseprodukte von 10% im Jahre 2050 am weltweiten gesamten Endenergiebedarf, so würde man hierfür eine weltweite Elektrolyseleistung von 3500 GW benötigen. Bisher ist weltweit erst eine Elektrolyseleistung von ca. 1 Gigawatt (GW) für die Herstellung von Wasserstoff, aus dem dann u.a. auch E-Fuels gewonnen werden, im Einsatz [5]. Zur Produktion des erneuerbaren Stroms müssten ca. 5250 GW an Leistung installiert werden. Die gesamte, heutige, weltweit installierte erneuerbare Stromproduktion beträgt 3100 GW [6]. Man müsste also die Erneuerbare Stromproduktion fast verdoppeln, alleine nur um den Strombedarf für grünem Wasserstoff und Syntheseprodukte einschließlich E-Fuels zu decken. Hinzu kommt, dass auch für andere Anwendungsfälle Erneuerbare Energien zur Erreichung der Klimaziele deutlich ausgebaut werden müssen, denn der Anteil an Erneuerbaren an der Stromerzeugung weltweit beträgt heute nur 28,1 % [7].

Ein weiteres Beispiel unterstreicht die Größenordnung der vorliegenden Aufgabe. Nach [8] müssen zu Erreichung der Klimaziele mindestens 60% des synthetischen Kerosins in Europa aus grünem Wasserstoff in Kombination mit CO₂ aus der Luft kommen. Um die benötigte Menge an diesem Kerosin im Jahr 2050 herzustellen, muss Europa mehr erneuerbaren Strom erzeugen als derzeit überhaupt in Europa erzeugt wird.

Aufgrund der bisher gemachten Erfahrungen zu Zeitskalen beim Aufbau von solchen komplexen Energieversorgungssystemen fehlt es bisher an Vorstellungen, wie dies überhaupt gelingen könnte. Die Wachstumsgeschwindigkeiten bei Elektrolyseuren, Erneuerbaren und Transportinfrastrukturen müssten weit höher liegen, als es in der Vergangenheit der Fall war [9].

Deshalb werden Wasserstoff und dessen Syntheseprodukte, wie E-Fuels, sehr wahrscheinlich lange noch knapp und teuer sein [10]. Ihr Einsatz sollte deshalb auf die Anwendungsbereiche konzentriert werden, wo es keine sinnvollen Alternativen gibt. Dies sind der Stahlsektor, die Grundstoffchemie, Raffinerien und der internationale Flug- und Schiffsverkehr [11]. Alleine die für diese Anwendungen notwendigen Mengen an Wasserstoff und synthetischen Brenn- und Kraftstoffen sind sehr hoch; in

Deutschland wären dies rund 15 % des Endenergiebedarfs im Jahr 2045 in einer treibhausgasneutralen Welt [12]. Dies spricht für eine prioritäre Anwendung für diese Bereiche. Für den Straßenverkehr verbleiben dann allerdings kaum mehr nutzbare Mengen [13]. Beim Einsatz von E-Fuels bei PKW und LKW sind die Umwandlungsverluste enorm - nur 13-15% des Erneuerbaren Stroms kommt beim heutigen Stand der Technik überhaupt am Antriebsrad an [14]). Gleichzeitig gibt es hier Alternativen wie die direkte Elektrifizierung, die fünf bis sechs Mal effizienter mit dem Strom umgeht (Wirkungsgrad von 70 bis 75 %) [15].

4 Was spricht aus wirtschaftlichen Gründen gegen den Einsatz von E-Fuels bei Pkw und Lkw?

Die im vorangestellten Kapitel aufgezeigte geringe Nutzung der Energie bei E-Fuels im Straßenverkehr führt auch zu einer weiteren Herausforderung. Die Nutzung von E-Fuels ist im Vergleich zu anderen Alternativen des Klimaschutzes im Straßenverkehr auf absehbare Zeit sehr teuer.

Heute findet noch keine kommerzielle Produktion von E-Fuels in größeren Umfang statt und man ist hier auf Studien angewiesen, was mit Unsicherheiten verbunden ist. Die Studien gehen davon aus, dass die Kosten heute bei 2,20 – 4,80 € pro Liter Kraftstoffbereitstellung und damit erheblich über den Marktpreis von ca. 0,60 bis 0,70 € pro Liter heutiger fossiler Kraftstoffe liegen [16]. Durch die Hebung von Kostensenkungspotenziale werden für 2050 Kosten von 1,20 bis 3,60 € pro Liter angegeben [17]. Weiterhin sind noch Steuern und Abgaben dazu zu rechnen. Die heutigen Werte dafür unterstellt, kommen dann noch einmal mit ca. 1 € pro Liter dazu. Zudem fehlen dabei noch Aufschläge für Gewinnmargen, Vertriebsausgaben sowie Forschungs- und Entwicklungskosten. In die Betrachtung ist weiterhin einzubeziehen, dass, wie im Abschnitt 3 gezeigt wurde, das Angebot in den nächsten Jahren sehr knapp sein dürfte. Und Knappheiten führen zu höheren Marktpreisen [18]. Dies sieht man an den Öl- und Gasweltmarktpreisen, die seit vielen Jahren schon deutlich über den Herstellkosten liegen, teilweise um den Faktor 2 bis 3.

E-Fuels sind damit nach aktuellem Wissensstand auch künftig deutlich teurer als heutige fossile Kraftstoffe, außer diese werden mit hohen CO₂-Aufschlägen bedacht. Sie sind sehr viel teurer als die direkte Nutzung von Strom in Elektrofahrzeugen (Pkw und Lkw [19]). Bewertet man die Kosten für den Klimaschutz, so liegen die CO₂-Vermeidungskosten bei Pkw mit E-Fuels in 2030 bei ca. 1000 €/tCO₂ und damit um den Faktor 8 bis 10 über denen der Elektromobilität [20]. Somit gibt es aus Sicht des Staates hinsichtlich einer Klimaschutzstrategie nur wenig Gründe, E-Fuels bei Pkw und Lkw zu fördern [21].

Das oft geäußerte Argument, dass E-Fuels benötigt werden, um die Treibhausgasemissionen bei Bestandsfahrzeuge zu senken gerade für einkommensschwächere Haushalte, die sich keinen Neuwagen anschaffen können, wird hierdurch hinfällig. Denn diese Haushalte können sich ohne hohe staatliche Subventionen auch diese Kraftstoffpreise kaum leisten. Weiterhin wird teilweise ein Szenario aufgebaut, dass nur wenige Nischenanwendungen wie landwirtschaftliche Maschinen oder Feuerwehrfahrzeuge, kleine Serien von bestimmten Sportwagen oder Oldtimer die E-Fuels nach 2045 nutzen würden. Mengemäßig ist dies wohl hinzubekommen, aber es stellt sich dann die Frage nach dem Erhalt und der Finanzierung der Betankungsinfrastruktur.

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Förderung von synthetischen Brenn- und Kraftstoffen für die anderen oben angesprochenen Anwendungen wie dem Flug- und Schiffsverkehr als sehr sinnvoll angesehen werden. Wegen der oben angesprochenen Knappheiten würde der Einsatz einer größeren Menge von E-Fuels im Straßenverkehr die Kosten in diesen Bereichen

aber erhöhen können und sich somit kontraproduktiv auf effiziente Klimaschutzstrategien auswirken können.

Damit sind diese Kraftstoffe auch wirtschaftlich für private und gewerbliche Nutzer im Straßenverkehr wenig attraktiv.

5 Welche ökologischen Herausforderungen stellen sich bei E-Fuels?

Auch die Umweltbilanz von E-Fuels wirft derzeit noch eine Reihe an Fragen auf. Bei der Verbrennung von E-Fuels im Motor fallen Luftemissionen (NO_x, Kohlenmonoxid und Feinstaub) in vergleichbarer Größenordnung wie bei Benziner an [22]. Dies muss in eine Umweltbewertung einfließen und Maßnahmen zu deren Verminderung müssen ergriffen werden. Da der Wirkungsgrad bei der Verwendung von E-Fuels gering ist, müssen große Mengen an Strom für die Herstellung aufgewendet werden. Der erforderliche Ausbau an Stromerzeugungskapazitäten ist u.a. mit einem enormen Flächen- und Ressourcenbedarf an kritischen Rohstoffen verbunden, der sich in einer Ökobilanz für E-Fuels negativ auswirkt [Ausfelder]. Kritisch wird auch der Betrieb der Elektrolyse gesehen, weil dieser einen nennenswerten Wasserverbrauch hat. Weiterhin müsste das bei der Verbrennung/Nutzung der E-Fuels wieder freigesetzte CO₂ zur Klimaneutralität aus der Luft abgeschieden werden durch Anlagen für das sogenannte Direct Air Capture (DAC). Da die CO₂-Konzentration in der Luft sehr gering ist (zurzeit 415 ppm = 0,0415 Vol.-%), ist ein hoher Energieverbrauch zu dessen Abtrennung erforderlich [23]. Für eine gute CO₂-Bilanz muss die dafür notwendige Energie (Strom, Wärme) möglichst aus CO₂-armen oder -freien Energieträgern erzeugt werden. Weiterhin werden relevante Mengen an Stahl zur Herstellung dieser DAC-Anlagen benötigt und durch die notwendige Größe der Anlagen kommt ebenfalls ein nennenswerter Flächenverbrauch hinzu. In vielen der Umweltauswirkungen schneiden sie schlechter ab als ihre fossile Referenz [24].

E-Fuels, die heute in Deutschland hergestellt werden, haben eine deutlich negative Klimabilanz gegenüber der fossilen Referenz [25]. Dies hängt wesentlich mit den deutschen Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung zusammen. Erst wenn deren fossile Anteile mehr als halbiert werden, ist die Herstellung von E-Fuels in Deutschland aus Klimasicht sinnvoll.

Somit verbleibt die Herstellung von E-Fuels im Ausland mit deutlich besseren Voraussetzungen zur Nutzung von möglichst ausschließlich erneuerbaren Energiequellen. Alleine schon aufgrund der begrenzten Potenziale an Erneuerbaren in Deutschland wird dies als notwendig angesehen [26]. Wie allerdings die später in Kapitel 7 gemachten Ausführungen zeigen, ist die Stromproduktion in vielen der dafür in Frage kommenden Stromproduktion heute ebenfalls noch sehr fossil-lastig. Hinzu kommt, dass in einigen der diskutierten Länder zudem eine beschränkte Wasserverfügbarkeit herrscht und evtl. auf Meerwasserentsalzungsanlagen zurückgegriffen werden muss. Meerwasserentsalzungsanlagen sind energieintensiv zu betreiben und die Ableitung des abgeschiedenen Salzes kann zu weiteren Umweltproblemen führen.

6 Warum trägt der kurzfristige Einsatz von E-Fuels im Straßenverkehr nicht zur Technologieoffenheit bei?

Aus wirtschaftlichen Gründen sowie Gründen der Risikoabsicherung ist es generell begrüßenswert, möglichst viele Option zur Verfügung zu haben, um die Treibhausgasemissionen zu senken. Dieses Argument wird oft auch beim Einsatz von E-Fuels im Straßenverkehr herangezogen. Nach heutiger Planung sollen E-Fuels allerdings die heute gültigen Kraftstoffnormen erfüllen, so dass motorensseitig sowie bei den Tankstellen keine weiteren Entwicklungen notwendig sind. Somit geht es um die Herstellung von synthetischen Brenn- und Kraftstoffen und dem Produktionshochlauf, die die Technologieoffenheit bestimmen. Da diese aber für die in Kapitel 3 genannten anderen Anwendungsfelder notwendig sein werden, ist davon auszugehen, dass die Entwicklung von E-Fuels unabhängig vom Straßenverkehr voranschreiten wird. Sollten sich die heutigen wissenschaftlichen Prognosen für E-Fuels wider Erwarten als zu pessimistisch erweisen, so könnte ihr Einsatz für den Straßenverkehr noch später stärker erwogen werden.

7 Warum sollte der Einsatz von E-Fuels in Entwicklungs- und Schwellenländern nicht gefördert werden?

Deutschland wird aufgrund der begrenzten Möglichkeiten des Ausbaus Erneuerbare Energien auf den Import von synthetischen Brenn- und Kraftstoffen angewiesen sein. Dies sollte in Regionen mit günstigen Bedingungen für die Erzeugung erneuerbaren Stroms erfolgen, etwa in sonnen- und windreichen Regionen. Deshalb sind die im Modernisierungspaket angesprochene Energiepartnerschaften mit Ländern aus Afrika und Südamerika grundsätzlich sinnvoll, um diese dann in Länder wie Deutschland zu exportieren.

Allerdings wird die im Modernisierungspaket vorgesehene Förderung der Eigennutzung von E-Fuels in diesen Partnerländern aus wissenschaftlicher Sicht eher kritisch gesehen. In den allermeisten dieser Länder, die derzeit stark im Fokus für die Produktion von E-Fuels stehen, ist die eigene Stromproduktion noch stark von fossilen Energieträgern geprägt, z.B. in Südafrika oder Chile mit 50% und mehr fossiler Stromproduktion [27]. Oder diese Länder können heute ihre eigene Stromnachfrage nur durch große Importmengen decken, wie beispielsweise Namibia durch importierten Kohlestrom aus Südafrika oder Marokko mit importiertem Strom aus fossilen Quellen aus anderen MENA-Ländern. Wenn man Klimaschutz in diesen Ländern fördern und die dafür notwendigen Finanzmittel mit möglichst großem Nutzen für die Treibhausgasreduzierung und die lokale Bevölkerung einsetzen will, so sollte man dort zuerst den Aufbau einer erneuerbaren Stromversorgung zur Deckung der Stromnachfrage fördern. E-Fuels sind eine viel zu ineffiziente und teure Klimaschutzmaßnahme, um mit dieser die Dekarbonisierung eines Landes zu starten. Erst wenn ein Land bereits sehr hohe Anteile der erneuerbaren Energieversorgung hat und damit über entsprechende Erfahrung verfügt (z.B. hinsichtlich Technologien, aber auch Geschäftsmodelle und Regulatorik), sollte der Übergang zum Zubau von E-Fuel-Produktion in Betracht gezogen werden.

8 Warum kann die Förderung von E-Fuels einen negativen Einfluss auf die Verkehrswende haben?

Die Diskussion um E-Fuels fokussierte sich zuletzt insbesondere auf ihre Verwendung im Pkw-Bereich. Ein Argument, was dabei auch angeführt wird, bezieht sich auf die (höhere) Akzeptanz von E-Fuels im Vergleich zu elektrischen Fahrzeugen oder auch Mobilität jenseits des Autos bei heutigen Pkw-Fahrerinnen und Fahrern. Diese Überlegung ist zunächst naheliegend, da E-Fuels im Grundsatz aus Sicht der Pkw-Fahrerinnen und Fahrern keine größeren Nutzungsänderungen erfordern.

Befragungsstudien [28] unterstützen dies aber nicht eindeutig: Bewertet die Bevölkerung verschiedene Innovationen von Elektroauto über alternative Kraftstoffe und E-Fuels sowie Wasserstoff-Brennstoffzelle, so fällt die Bewertung zu verschiedenen Innovationen für Pkw neutral bis leicht positiv aus und sie ist für alle ähnlich hoch. Gleichzeitig schätzen die befragten Personen ihr Wissen zu den Alternativen zum Verbrennungsmotor im Durchschnitt als mittelmäßig bis niedrig ein.

Vor diesem Hintergrund lässt sich vermuten, dass in großen Teilen der Bevölkerung momentan kein tieferes Wissen zur (begrenzten) Verfügbarkeit, zu (hohen) Kosten und den nicht zu vernachlässigenden Umweltauswirkungen von E-Fuels vorhanden ist. Dies könnte sich jedoch in den nächsten Jahren durch intensivere gesellschaftliche Debatten ändern und Rückwirkungen auf die Akzeptanz haben. Die gesellschaftlichen Diskussionen zur Beimischung von Biosprit haben gezeigt, dass die Stimmung auch negativ ausfallen kann. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn die Diskrepanz zwischen tatsächlichem Entwicklungsstand und Kosten und der in der Diskussion suggerierten möglichen Entwicklung offensichtlich wird (siehe die Diskussion in den Abschnitten zuvor).

Gleichzeitig kann die aktuelle Diskussion aber dazu führen, dass sich Initiativen in Richtung Elektromobilität oder anderer alternativer Mobilitätsformen verlangsamen. So zeigen Studien, dass Personen mit geringerem Interesse an Elektrofahrzeugen oder Carsharing sich stark an sozialen Normen orientieren, d.h. an dem, was andere Bürgerinnen und Bürger tun [29]. Je mehr beobachtbar diese Mobilitätsalternativen werden, desto eher werden sie diese nutzen wollen und für sich in Betracht ziehen. Der Hochlauf der Elektromobilität und anderer Mobilitätsalternativen geht also dann schneller, wenn eine kritische Masse so schnell wie möglich erreicht ist und andere vom Verhalten anderer angesteckt werden. Ein Signal, eine bisher nicht vorhandene Zukunftstechnologie wie E-Fuels in Aussicht zu stellen, ohne genaue Planungshorizonte oder Kosten zu vermitteln, wirkt dabei verzögernd und verunsichernd.

Viele Menschen und gerade auch Unternehmen inklusive Teile der Automobilbranche, könnten auch einen Glaubwürdigkeitsverlust in politisches Handeln erleiden, wenn falsche Erwartungen geweckt werden. Glaubwürdigkeit und wahrgenommene Konsistenz des politischen Handelns sind jedoch zentrale Voraussetzungen, um Innovationen voranzutreiben und etwa entsprechend zu investieren [30].

Ein weiterer Aspekt ist, dass die Diskussion um E-Fuels den notwendigen Umbau und die Transformation der Automobilindustrie sowohl direkt als auch indirekt verzögern könnte: Unmittelbar würde dies vermutlich auf die Zulieferindustrie zutreffen, die momentan teilweise noch zögert, ihre Produkte auf andere alternative Antriebe umzurüsten. Mittelbar entsteht möglicherweise Unsicherheit bei Kapitalgebern und Investoren. Hier ergeben sich somit auch Risiken für den Wirtschaftsstandort Deutschland.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Erwartung einer hohen Akzeptanz von E-Fuels und damit verbunden auch einer Bereitschaft hohe Preise zu zahlen, auf unsicherer Grundlage steht. Gleichzeitig erhöht die aktuelle Diskussion die Gefahr, dass die notwendige und sinnvolle Transformation in Richtung Elektrifizierung und anderer alternativen Mobilitätsformen sich stark verzögert.

Dadurch könnte das Erreichen der notwendigen Klimaziele im Verkehr deutlich erschwert werden und wirtschaftliche Schäden durch eine verzögerte Transformation der Industrie entstehen.

9 Fazit

Nach heutiger Studienlage sollte sich der Einsatz von Syntheseprodukten auf Basis von strombasiertem Wasserstoff in Deutschland auf bestimmten einzelnen Industriezweigen wie der chemischen Industrie sowie im internationalen Flug- und Schiffsverkehr fokussieren. Hier gibt es außer der Nutzung von Wasserstoff und Syntheseprodukten kaum Alternativen. Die nachgefragte Menge nach Syntheseprodukten wird dort zur Erreichung der klimapolitischen Ziele nach heutigem Kenntnisstand hoch sein. Hierfür müssen entsprechende Produktionskapazitäten sehr schnell hochgefahren werden, was eine enorme Herausforderung darstellt. Diese Syntheseprodukte werden deshalb im Vergleich zum Bedarf knapp und damit auch teuer sein. Somit ist deren Einsatz in anderen Bereichen wie bspw. dem Straßenverkehr, in denen E-Fuels auf Strombasis sehr ineffizient genutzt werden, eher kritisch zu reflektieren, weil

- diese bis Ende der 2030er kaum in relevanten Mengen dafür verfügbar sind,
- diese deutlich teurer als die heute schon existierenden Alternativen der direkten Stromnutzung sind und nach heutigem Kenntnisstand dies auch künftig sein werden, was E-Fuels für einkommensschwächere Schichten in Zukunft wenig attraktiv macht,
- eine deutlich stärkere erneuerbare Stromproduktion allein für E-Fuels erfordern würde, was auch einen immensen Ausbau der dafür notwendigen Infrastruktur nach sich zieht,
- diese zu beachtlichen ökologischen Herausforderungen führen und ihre Herstellung in Deutschland derzeit aus Klimaschutzaspekten keinen Sinn ergeben,
- bei einer größeren staatlichen Förderung diese den Fokus auf einen Bereich lenken, in dem Klimaschutzmaßnahmen sehr teuer sind und somit Geld in anderen sinnvolleren Bereichen fehlt,
- der Verzicht auf eine kurz- und mittelfristige Markteinführung die künftige Technologieoffenheit bei Fahrzeugen nicht beschränkt,
- diese die Transformation der Automobilindustrie in Deutschland verzögern können und
- bei Bürgerinnen und Bürger falsche Vorstellungen bzgl. der Mobilität der Zukunft wecken können, was aus Innovationsperspektive die Transformation des Verkehrssektors Richtung Klimaneutralität weiter verzögern kann.

10 Anmerkungen und Quellen

- [1] Siehe Umweltbundesamt (Hrsg.) (2020): Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. Abschlussbericht. Studie durchgeführt von ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt und JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Im Auftrag des Umweltbundesamtes und Jeswani et al. (2020): Environmental sustainability of biofuels. A review. In The royal Society, November 2020, <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0351>
- [2] Siehe zu Potenzialangaben Deutsche Energie-Agentur GmbH (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Deutsche Energie-Agentur. Download https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf und Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie (Wuppertal-Institut) (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Berlin. Download: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_01_DE_KNDE2045/KNDE2045_Langfassung.pdf und Thrän D, et al. (2019): Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO). Download: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/technoekonomische-analyse60-und-transformationspfade-des-energetischenbiomassepotentials.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- [3] Siehe zu den Systemstudien die Studie Fraunhofer ISI, Consentec, ifeu, Technische Universität Berlin (2022): Langfristszenarien. Studie im Auftrag des BMWK. Download: <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php> oder den Überblick zu verschiedenen Systemstudien in Ariadne (2021): Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>
- [4] Siehe die Auswertung von verschiedenen Studien in Riemer et al. (2022): Future hydrogen demand: A cross-sectoral, multiregional meta-analysis. HYPAT Working Paper 04/2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (ed.). Es gibt dabei auch extremer Szenarien, die einen noch höheren Bedarf aufzeigen.
- [5] Siehe IEA (2022): Electrolysers - Technology deep dive. Download: <https://www.iea.org/reports/electrolysers>
- [6] Zahlen aus Statista für das Jahr 2021, Download <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/200732/umfrage/wasserkraft-und-erneuerbare-energien-weltweit/#:~:text=Im%20Jahr%202021%20betrug%20die,bei%20lediglich%201%2C9%20Terawatt>.
- [7] Siehe Enerdata: Anteil der erneuerbaren an der Stromerzeugung. Download <https://energiestatistik.enerdata.net/erneuerbare-energien/erneuerbare-anteil-in-stromproduktion.html>.
- [8] Siehe Studie von Deutsche Energie-Agentur (Publisher) (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. Downlaod:

https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/STUDY_E-Kerosene_for_Commercial_Aviation.pdf

- [9] Dass die Versorgung mit grünem Wasserstoff selbst dann knapp und langfristig unsicher bleiben wird, wenn die Elektrolysekapazitäten so schnell wachsen wie Wind- und Solarenergie es getan haben und damit kurzfristig knapp und langfristig ungewiss bleiben wird, zeigen auch Odenweller et al. (2022): Probabilistic feasibility space of scaling up green hydrogen supply. In Nature Energy. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01097-4>. Trotz des anfänglichen exponentiellen Wachstums wird grüner Wasserstoff wahrscheinlich ($\geq 75\%$) nur $< 1\%$ der Endenergie bis 2030 in der Europäischen Union und 2035 weltweit decken können. Siehe zur größeren Diskussion der Herausforderungen beim Wasserstoff- und Syntheseproduktaufbau auch die beiden Studien Odenweller et al. (2022): Wasserstoff und die Energiekrise: fünf Knackpunkte. Kopernikus-Projekt Ariadne und Sachverständigen Rat für Umwelt (SRU) (2021): Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse. Stellungnahme.
- [9] Zu den Bedarf an Wasserstoff und Syntheseprodukten in Deutschland siehe Fraunhofer ISI, Consentec, ifeu, Technische Universität Berlin (2022): Langfristszenarien. Webseite Download: <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>.
- [10] Siehe hierzu auch die Analyse in Sachverständigen Rat für Umwelt (SRU) (2021): Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse. Stellungnahme.
- [11] Diese Forderungen wird in vielen Studien erhoben, siehe z.B. Ariadne (2021): Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006> und Sachverständigen Rat für Umwelt (SRU) (2021): Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse. Stellungnahme und Ausfelder et al. (2021): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien. 3. Roadmap des Kopernikus-Projektes P2X Phase II.
- [12] Siehe Sensfuß et al. (2022): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Szenarien T45, Überblickswebinar 15.11.2022. Download: https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45_Szenarien_15_11_2022_final.pdf.
- [13] Hier ist eine Einschränkung zu machen. Die Raffinerieprozesse zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen für die Herstellung von synthetischen Brenn- und Kraftstoffen sind komplex und prozessbedingt können mehrere Produkte anfallen. So könnte es beispielhaft sein, dass bei der Herstellung von synthetischen Flugkerosin prozessbedingt eine gewisse Menge an Ottokraftstoffen anfällt, die dann im Straßenverkehr eingesetzt werden könnte. Hier ist allerdings zu prüfen, ob es sich überhaupt um relevante Mengen handelt und ob nicht Änderungen im Produktionsprozess bzw. bei der gewählten Prozessroute dies vermeiden können.
- [14] Siehe u.a. Umweltbundesamt: Kraftstoffe und Antriebe. Download <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/kraftstoffe-antriebe#undefined>.
- [15] Künftig kann es Wirkungsgradsteigerungen geben, beispielsweise beim Elektrolyseur zur Wasserstoffherstellung. Aber insbesondere der niedrige Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors verhindert hier größere Steigerungen im Gesamtwirkungsgrad. Er kann bis maximal 20 % hochgehen.
- [11] Ausgehend von Stromherstellung 100%, wie bei den eFuels gerechnet. Wirkungsgrad variiert u.a. durch Art der Ladung der Fahrzeuge.

- [16] Diese Angaben wurden übernommen aus Kreidelmeyer et al. (2020): Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Endbericht zum Projekt „Transformationspfade und regulatorischer-Rahmen für synthetische Brennstoffe“. Prognos. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Eine Größenordnung von 3,20 € pro Liter ohne Steuern etc. lässt sich aus Ueckerdt et al. (2021): Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. in Nature Climate Change, Download <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01032-7> ableiten.
- [17] In Kreidelmeyer et al. (2020): Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Endbericht zum Projekt „Transformationspfade und regulatorischer-Rahmen für synthetische Brennstoffe“. Prognos. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie werden 1,80 bis 3,60 €/l für 2050 genannt. Andere Studien weisen zum Teil für diesen Zeitraum als untere Herstellkosten 1,20 €/l aus und als obere 1,80 €/l, siehe z.B. Umweltbundesamt (2022): Power-to-Liquids A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation und ähnliche Größenordnungen in Ausfelder et al. (2021). Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-To-X Technologien – Transformation - Anwendungen –Potenziale. 3. Roadmap des Kopernikus-Projektes PtX, Download: file:///C:/Users/wi/dec_p2x_ii_v06_online_small.pdf. Nimmt man synthetisches Methan als Basis für die Herstellkosten (die meisten Prozessschritte sind gleich wie bei flüssigen E-Fuels) dann lassen sich Werte von 1,50 bis 2,40 € pro liter für 2030 aus den beiden Veröffentlichungen Hank et al.: (2020): Energy efficiency and economic assessment of imported energy carriers based on renewable electricity. In Sustainable Energy Fuels 5 2020. Retrieved from 10.1039/d0se00067a und Lux et al.. (2020): A supply curve of electricity-based hydrogen in a decarbonized European energy system in 2050. Applied Energy, 269, 115011. Permalink: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115011> ableiten. Allerdings sind dies nur Kosten bis zur Grenze nach Deutschland, Weiterverteilungskosten und Tankstellenkosten fehlen.
- [18] Siehe zu dieser Diskussion auch Wietschel et al. (2021): Import von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten: von Kosten zu Preisen. HYPAT Working Paper 01/2021. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (Hrsg.).
- [19] Siehe zu der mangelnden Wirtschaftlichkeit von E-Fuels bei Lkw im Vergleich zu anderen Alternativen die Studien Gray et al. (2022): Batteries, fuel cells, or engines? A probabilistic economic and environmental assessment of electricity and electrofuels for heavy goods vehicles und Unterlohner (2021): How to decarbonise long-haul trucking in Germany. An analysis of available vehicle technologies and their associated costs und Gnann et al. (2022b): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. T45-Szenarien. Modul Verkehr.
- [20] Zahlen aus Wietschel et al. (2022): Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien. Studie zum deutschen Innovationssystem | Nr. 9-2022. Im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI). Eine ähnliche Größenordnung berechnen Ueckerdt et al. (2021): Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. in Nature Climate Change, Download <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01032-7>. Ueckerdt et al (2021) sehen, dass eine groß angelegte Einführung die Kosten bis 2050 auf 20-270 € pro tCO₂ senken können, doch dort wird bilanziert, dass es unwahrscheinlich, dass E-Kraftstoffe früh genug billig und im Überfluss vorhanden sein werden.
- [21] In Sensfuß et al. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 Kurzbericht: 3 Hauptszenarien 05/2021 wird gezeigt, dass ein Szenario,

welches sich stärker auf Synthetische Brenn- und Kraftstoffe stützt, volkswirtschaftlich deutlich teuer ist als Szenarien die vermehrt auf eine direkte Elektrifizierung oder die direkte Nutzung von Wasserstoff setzen.

- [22] Siehe hierzu Transport Environment (2012): Test zeigen: Synthetische Kraftstoffe bei Autos sind genauso umweltbelastend wie Benzin. Download <https://www.transportenvironment.org/discover/tests-zeigen-synthetische-kraftstoffe-bei-autos-sind-genauso-umweltbelastend-wie-benzin/>.
- [23] Siehe Realmonte et al. (2019): An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways. In: Nature communications 10 (1), S. 3277. DOI: 10.1038/s41467-019-10842-5. und Keith et al. (2018): A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. In: Joule 2 (8), S. 1573–1594. DOI: 10.1016/j.joule.2018.05.006.
- [24] Siehe Ausfelder et al. (2021): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien. 3. Roadmap des Kopernikus-Projektes P2X Phase II und Umweltbundesamt (Hrsg.) (2020): Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. Abschlussbericht. Studie durchgeführt von ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt und JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Im Auftrag des Umweltbundesamtes und Jülich et al. (2022). Ökobilanzen für synthetisches Kerosin - Vergleich von Produktionsrouten in MENA und Deutschland. MENA-Fuels: Teilbericht 2 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Wuppertal, Stuttgart, Köln, Saarbrücken.
- [25] Siehe Wietschel et al. (2022): Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien. Studie zum deutschen Innovationssystem | Nr. 9-2022. Im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) und Ausfelder et al. (2021): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien. 3. Roadmap des Kopernikus-Projektes P2X Phase II und Umweltbundesamt (Hrsg.) (2020): Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. Abschlussbericht. Studie durchgeführt von ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt und JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH. Im Auftrag des Umweltbundesamtes und Pichlmaier et al. (2020): Ökobilanzen synthetischer Kraftstoffe Methodikleitfaden. Projekt Beniver – Begleitforschung Energiewende im Verkehr. Beim Ansatz, welche Treibhausgasemissionen bei E-Fuels oder auch der Elektromobilität angesetzt werden dürfen, gibt es unterschiedliche Ansichten. Da der Strom überwiegend aus dem Stromnetz kommt ist eine physikalische Zuordnung von Strom zu einzelnen Anwendungen nicht möglich. Man muss damit eine bilanzielle Zuordnung vornehmen. Um die deutschen Klimaziele erreichen zu können, müssen die Erneuerbaren mit maximaler Geschwindigkeit ausgebaut werden. Einen zusätzlichen Ausbau von Erneuerbaren Energien und damit einer Zuordnung von nur Erneuerbaren Strom für eine Anwendung, es sei denn für Inselösungen, kann es damit nicht geben. Deshalb hat sich der Ansatz in der Politikberatung durchgesetzt, Strom, der im Verkehr eingesetzt wird, mit den Treibhausgasemissionen des Strommixes zu bewerten. Siehe zu den Diskussionen Wietschel et al. (2022): Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien. Studie zum deutschen Innovationssystem | Nr. 9-2022. Im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) und Marmiroli et al. (2018): Electricity Generation in LCA of Electric Vehicles: A Review. In Appl. Sci. 2018, 8, 1384; Permalink: doi:10.3390/app8081384.

- [26] Siehe hierzu die Auswertung mehrerer Studien in Wietschel et al. (2021): Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe, Freiburg, Cottbus: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEG.
- [27] Viele Informationen zu den Energiesystemen der einzelnen Länder findet man auf den Seiten der Internationalen Energie Agentur (IEA) (<https://www.iea.org>).
- [28] Siehe Scherrer, Aline (in press). How media coverage of technologies impacts public opinion: evidence from alternative fuel vehicles in Germany. *Environmental Innovation and Societal Transitions*.
- [29] Siehe Burghard et al. (2019): Who wants shared mobility? Lessons from early adopters and mainstream drivers on electric carsharing in Germany. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 71, S. 96–109. DOI: 10.1016/j.trd.2018.11.011.
- [30] Siehe Rogge et al. (2018): [Do policy mix characteristics matter for low-carbon innovation? A survey-based exploration of renewable power generation technologies in Germany](#). In: *Research Policy*, 47, 1639-1654. und Rogge et al. (2018): [What makes them believe in the low-carbon energy transition? Exploring corporate perceptions of the credibility of climate policy mixes](#). In: *Environmental Science Policy*, 87, 74-84.