

# Synthetische Kraftstoffe – Ökonomie, Gesellschaft, Nachhaltigkeit

## Einleitung

Im Rahmen der Energiewende werden strombasierte und synthetische Kraftstoffe (ab hier stellvertretend E-Fuels genannt) als klimaneutrale Option in bestimmten Anwendungen angesehen.

Im Verkehrsbereich eröffnen sie Möglichkeiten für Hochseeschifffahrt, Luftfahrt und teilweise auch für den Schwerlastverkehr.

In Industrieprozessen, die eine hohe Energiedichte erfordern, ist ein direkt-elektrischer Einsatz erneuerbarer Energien (EE) nur schwer umsetzbar. Daher sind auch hier E-Fuels eine mögliche Alternative.

Ein breiterer Einsatz von E-Fuels – Defossilisierung genannt – wirft neben den technischen Herausforderungen (vgl. Sauer et al. 2021) auch ökonomische, gesellschaftliche und ökologische Fragen auf:

- Ökonomisch betrachtet stellen sich z. B. Fragen nach den Kosten und damit, in welchen Anwendungen und in welchem Maße ein Einsatz von E-Fuels ökonomisch sinnvoll ist, welche Strukturänderungen dies impliziert und wie ein Markthochlauf zu gestalten ist.
- Gesellschaftlich stellen sich z. B. Fragen, welche Technologien oder Ressourcen genutzt werden sollen, wie E-Fuels in einer breiter angelegten Verkehrswende einzuordnen sind oder wie ein notwendiger zusätzlicher inländischer Ausbau an EE für E-Fuels zu bewerten ist, gegenüber dem alternativen Import von E-Fuels aus möglicherweise autoritären und/oder politisch instabilen Weltregionen.
- Ökologisch kann gefragt werden, unter welchen Bedingungen E-Fuels überhaupt nachhaltig sind und welche weiteren Kriterien – neben der Voraussetzung, dass der Strom aus EE sein sollte – noch erfüllt sein müssen.

Dieser Artikel gibt anhand von Projektbeispielen einen Überblick über die Forschungsaktivitäten des FVEE. Dabei werden E-Fuels entlang der Wirkungskette betrachtet:

- Kohlenstoff-Quellen
- Herstellverfahren und Produkte
- Wertschöpfungsketten und -netzwerke
- Anwendungen.

## Markteinführung

Im heutigen Energiemix sind E-Fuels praktisch nicht existent. Für die Zukunft wird aber für die o. g. Anwendungen ein relevanter Beitrag erwartet, woraus sich die Frage des Markthochlaufs ergibt. Aus ökologischer Sicht müssen der eingesetzte Strom und das CO<sub>2</sub> aus erneuerbaren Quellen stammen, um klimaneutral zu sein<sup>1)</sup>.

Der Produktionsprozess von E-Fuels ist mehrstufig (vgl. Sauer et al. 2021), wodurch jeweils Wirkungsgradverluste entstehen. Das häufige Vorprodukt Wasserstoff (H<sub>2</sub>) wird aus der Elektrolyse (Power-to-Gas, PtG) mit EE-Strom erzeugt, um klimaneutral zu sein (EE-H<sub>2</sub>). Soll das CO<sub>2</sub> zukünftig aus der Umgebungsluft gewonnen werden (Direct Air Capture, DAC), wäre der notwendige Strombedarf besonders hoch (vgl. Abschnitt C-Quellen).

Insgesamt steigt der EE-Strombedarf – zusätzlich zum „normalen“ Ausbaupfad – entsprechend an, um die notwendigen Mengen an E-Fuels zu erzeugen. Da der Mehrbedarf an EE-Strom durch den sich abzeichnenden EE-Ausbau im Inland nicht gedeckt werden kann, entsteht die Erwartung, den überwiegenden Teil an E-Fuels zu importieren. Eine Meta-Analyse neuerer Szenarien (2018-2020) zeigt in ► **Tabelle 1**, dass die Importquote in einem Szenario zwar nur bei 49% und einem weiteren bei 74% liegt, dass aber die restlichen Szenarien eine Importquote zwischen 80 und 100% erwarten. Die Meta-Analyse ist nicht repräsentativ, vermittelt aber einen ersten Eindruck von der Größenordnung der Importnotwendigkeit.

Die 2020 veröffentlichte nationale Wasserstoff-Strategie geht für 2030 von einer H<sub>2</sub>-Importquote von 80–90% aus (BMWi (Hg.) 2020, S. 5, eigene Berechnung).

Der überwiegende Import von E-Fuels in der Zukunft hat Konsequenzen für die Instrumente des Markthochlaufs. Markteinführungsmechanismen (MEM) können prinzipiell an verschiedensten Stellen ansetzen (Akteur, Produkt, Anlage), unterschiedliche Ziele (Preis, Menge, Produktklasse) und Wirkweisen (vorschreibend, informierend etc.) haben. Somit müssen Wertschöpfungsketten, Standortfaktoren und Governance-Strukturen berücksichtigt werden,



### IZES

Dr. Patrick Matschoss  
matschoss@izes.de

Eva Hauser  
hauser@izes.de

### DBFZ

Dr. Franziska Müller-Langer  
franziska.mueller-langer@dbfz.de

Jörg Schröder  
joerg.schroeder@dbfz.de

### DLR

Dr. Urte Brand  
urte.brand@dlr.de

Dr. Ralph-Uwe Dietrich  
ralph-uwe.dietrich@dlr.de

### FZ Jülich

Lea Eggemann  
l.eggemann@fz-juelich.de

Prof. Dr. Ralf Peters  
ra.peters@fz-juelich.de

### Fraunhofer ISE

Lara Theiss  
lara.theiss@ise.fraunhofer.de

### KIT

Prof. Dr. Roland Dittmeyer  
roland.dittmeyer@kit.edu

Dr. Christine Rösch  
christine.roesch@kit.edu

Dr. Martina Haase  
martina.haase@kit.edu

### UFZ

Dr. Markus Millinger  
markus.millinger@ufz.de

### Wuppertal Institut

Dr. Julia Terrapon-Pfaff  
julia.pfaff@wupperinst.org

### ZSW

Anna-Lena Fuchs  
anna-lena.fuchs@zsw-bw.de

Maïke Schmidt  
maïke.schmidt@zsw-bw.de

Tabelle 1  
**Mengen und Importe von PtG und PtF in 2050:**  
 Meta-Analyse neuerer Szenarien (2018–2020)  
 (Quelle: IZES)

Szenario	PtF (TWh/a in 2050)	Import (TWh/a in 2050)	Importquote in 2050
Fraunhofer ISE (2020)* „Referenz“ 95%	41 (F)	20 (F) 130 (H2)	49% (F)
Fraunhofer ISE (2020)* „Beharrung“ 95%	419 (F)	380 (F) 150 (H2)	91% (F)
BMVi (2019) „S95“	180 (F) 240 (H2)	149 (F)	ca. 83% (F)
UBA (2019) „GreenEe1“	204	204	100%
UBA (2019) „Greenlate“	333	333	100%
BDI (2018) „95%-Pfad“**	268	244	91%
Dena (2018) „EL95“***	43 (F) 169 (H2), 321 (CH4)	32 (F) 125 (H2), 238 (CH4)	74% über alle (EU / nicht-EU ca. gleich)
Dena (2018) „TM95“***	108 (F) 169 (H2), 630 (CH4)	89 (F) 139 (H2), 517 (CH4)	82% über alle (EU 22%, nicht-EU 60%)
<small>Kursiv: eigene Berechnung; F: „flüssige Energieträger“                      *CO<sub>2</sub>-freie Anteile flüssiger Energieträger eigene Berechnung. ** inkl. PtG. *** nur nat. Verkehr. Importquote gesamt über CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, F.                      BDI (2018): Klimapfade für Deutschland                      BMVi (2019): rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen</small>		<small>Dena (2018): dena-Leitstudie integrierte Energiewende                      Fraunhofer ISE (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem                      Nitsch (2019): Noch ist erfolgreicher Klimaschutz möglich                      UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende THG-Neutralität. RESCUE-Studie</small>	

die aber je nach Exportland unterschiedlich sind. Wirksame MEM setzen also voraus, rechtzeitig eine möglichst genaue Vorstellung von möglichen Handelspartnern zu entwickeln. Aus Nachhaltigkeitssicht sollte ein Export von E-Fuels (oder H<sub>2</sub>) noch Raum für die Transformationsziele des jeweiligen Exportlandes lassen (Stichworte EE-Eigenbedarf und Paris-Abkommen) und zumindest konsistent mit den Entwicklungszielen vor Ort sein.

Am IZES werden im Projekt „Begleitforschung Energiewende im Verkehr“ („BEniVer“<sup>2)</sup>) entsprechende Kriterien-Sets entwickelt, um mögliche Handelspartner zu identifizieren und darauf aufbauend angepasste MEM zu entwickeln.

### Kohlenstoff-Quellen

Eine technische Herausforderung stellt die Erschließung ausreichend konzentrierter, nicht-fossiler Kohlenstoff-Quellen (C-Quellen) dar, mit denen der Atmosphäre kein zusätzliches CO<sub>2</sub> hinzugefügt, sondern ein Kreislauf geschlossen wird<sup>3)</sup>. Für den im erneuerbaren CO<sub>2</sub> enthaltenen Kohlenstoff kommen prinzipiell diese Quellen in Frage:

- Punktquellen aus Verbrennungsprozessen mit biologischen Eingangsstoffen (Abgase),
- biologische Fermentation (Biogasanlagen) oder
- direkte Gewinnung aus der Umgebungsluft (Direct Air Capture, DAC).

Dabei sind v.a. Ersteres und Letzteres noch mit hohen Kosten verbunden (Sauer et al. 2021). Eine Übersichtsstudie des UFZ (Millinger et al., 2021) zeigt daher, dass die direkte Stromnutzung zunächst zu

bevorzugen ist, dann kommt die Umwandlung in H<sub>2</sub>. PtX-Anlagen sollten – bei der Produktion in Deutschland – v.a. mit sog. „Überschussstrom“ betrieben werden. Ansonsten werden bei der graduellen Dekarbonisierung des deutschen Strommixes im Zeitablauf auch E-Fuels erst langfristig emissionsärmer als fossile Kraftstoffe.

Bei der Frage der C-Quelle verweist die Studie schließlich auf die Nutzung biogener Quellen (Biomethan oder Biomass-to-Liquid, BtL), wodurch die Notwendigkeit zur Nutzung anderer Quellen verringert werden kann.

Die bisherige Form von Direct Air Capture (DAC) ist mit hohem Strom- und Flächenverbrauch behaftet. Daher wurde die Produktion für Wüstenregionen geplant, von denen nach Europa exportiert werden soll. Um eine nachhaltigere DAC-Produktion zu ermöglichen, wurde am KIT-Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT) im Rahmen der Netto-Null-Initiative<sup>4)</sup> eine neue DAC-Technologie entwickelt (Dittmeyer et al. 2019). In der Vision des „Crowd Oil“ werden dezentrale DAC-Anlagen in Lüftungs- und Klimaanlage von Gebäuden integriert und die dort ohnehin notwendigen Luftumwälzungen zur CO<sub>2</sub>-Absorption genutzt (► **Abbildung 1**).

Durch die Integration (auch mit gebäudeintegrierter PV) kann die Effizienz der Produktion erhöht werden. Durch die verbrauchsnahe Bereitstellung des CO<sub>2</sub> werden weitere Synergien geschaffen, indem dort auch Synthesegas und/oder E-Fuels hergestellt und fossile Kraftstoffe verdrängt werden („crowd oil“). Untersuchungen zum regulatorischen Rahmen (Klimaschutz, Energie- und Baurecht) begleiten das Projekt (Markus et al. 2021a, 2021b).



Abbildung 1

**DAC nach dem Crowd-Oil-Ansatz**

(Quelle: Helmholtz Klima Initiative 2020, KIT)

### Herstellverfahren und Produkte

Ein weiteres Beispiel für ein dezentrales Herstellverfahren ist die Methanol-Synthese unter Nutzung von  $\text{CO}_2$  aus landwirtschaftlicher Biomasse (Peters et al. 2020). Hierzu wurde am FZ Jülich in einer Lebenszyklusanalyse gezeigt, dass durch die Verarbeitung von landwirtschaftlichen Reststoffen (Gülle und Strohreste) in Güllekleinanlagen in Deutschland Emissionseinsparungen im Vergleich zur konventionellen Dampfreformierung von Erdgas erreicht werden können. Dies würde landwirtschaftliche Biogasanlagen stärker in die Verkehrswende einbinden, indem es die Bereitstellung „fortschrittlicher Kraftstoffe“ (advanced fuels) unter der neuen europäischen Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (RED II) ermöglicht. Mit Blick auf eine teilweise auslaufende Finanzierung durch das EEG würde es den Anlagenbetreibern auch ein neues Geschäftsfeld eröffnen (Eggemann et al. 2020).

Ein anderes Beispiel zur Nutzung von biogenen Reststoffen / Nebenprodukten / Abfällen für die Bereitstellung von advanced fuels im Verkehr ist das SynBioPtX-Projekt<sup>5)</sup> am DBFZ. Die genannten Stoffe sollen mit  $\text{EE-H}_2$  zur synthesebasierten Erzeugung von Methan genutzt werden. Neben der Evaluation des Ressourcenpotenzials und der Darstellung der Wertschöpfungskette sieht das Projekt die Planung, den Bau und Betrieb einer Pilotanlage sowie die Vorplanung einer Demonstrationsanlage vor.

Am KIT-Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) wurde eine neue multikriterielle Bewertungsmethode entwickelt, um die unterschiedlichen Nachhaltigkeitsaspekte in einem gemeinsamen, technologieübergreifenden Ansatz zu bewerten. Die Methode wurde anhand des bioliq-Verfahrens vorgestellt, das E-Fuels aus Rest-Biomasse herstellt (Haase et al. 2020). Nachhaltigkeitsbewertungen bestehen meist aus verschiedenen ökologischen, ökonomischen

und sozialen Indikatoren. Diese stehen meist unverbunden nebeneinander und ergeben kein kohärentes Gesamtbild, da bestimmte Kraftstoffe jeweils Vorteile in einigen und Nachteile in anderen Bereichen haben, die nicht einfach miteinander verrechnet werden können, so dass die Abwägung der unterschiedlichen Aspekte notwendig wird. Diese Abwägung hängt vom Wertesystem und der Perspektive der Nutzer\*innen ab, ist also dezidiert subjektiv und normativ. In einer innovativen Weiterentwicklung wurden daher Stakeholder-Profile mit verschiedenen Eigenschaften („individualistisch“, „hierarchisch“, „egalitär“) für die Gewichtung der Indikatoren genutzt. So können Bewertungen aus gesellschaftlicher Sicht kategorisiert und transparent gemacht und für die Entscheidungs- und Kompromissfindung wissenschaftlicher Ergebnisse genutzt werden.

### Wertschöpfungsketten und -netzwerke

Da die E-Fuels überwiegend importiert werden sollen, spielt bei der Analyse der Wertschöpfungsketten und -netzwerke das Herkunftsland eine entscheidende Rolle. So wurde am Fraunhofer ISE eine Fallstudie zu den PtX-Gestehungskosten in Marokko als möglichem Exporteur von E-Fuels durchgeführt (Hank et al. 2020). Zwar sind PtX-Produkte insgesamt teurer als die fossile Referenz, aber mit 90 Euro/MWh kommen die Gestehungskosten von gasförmigem  $\text{EE-H}_2$  in Marokko der fossilen Referenz von 60 Euro/MWh vergleichsweise nahe. Werden zum  $\text{EE-H}_2$  die Kosten von Verflüssigung, Speicherung und Transport hinzugerechnet, beträgt der Preis in Deutschland 126 Euro/MWh. Dabei machen die  $\text{EE-}$ Stromerzeugungs- und Elektrolyseanlagen ca. 50% der Gestehungskosten aus. Die reinen Transportkosten (shipping) fallen nur wenig ins Gewicht, die Kosten der Verflüssigung sind hingegen signifikant.

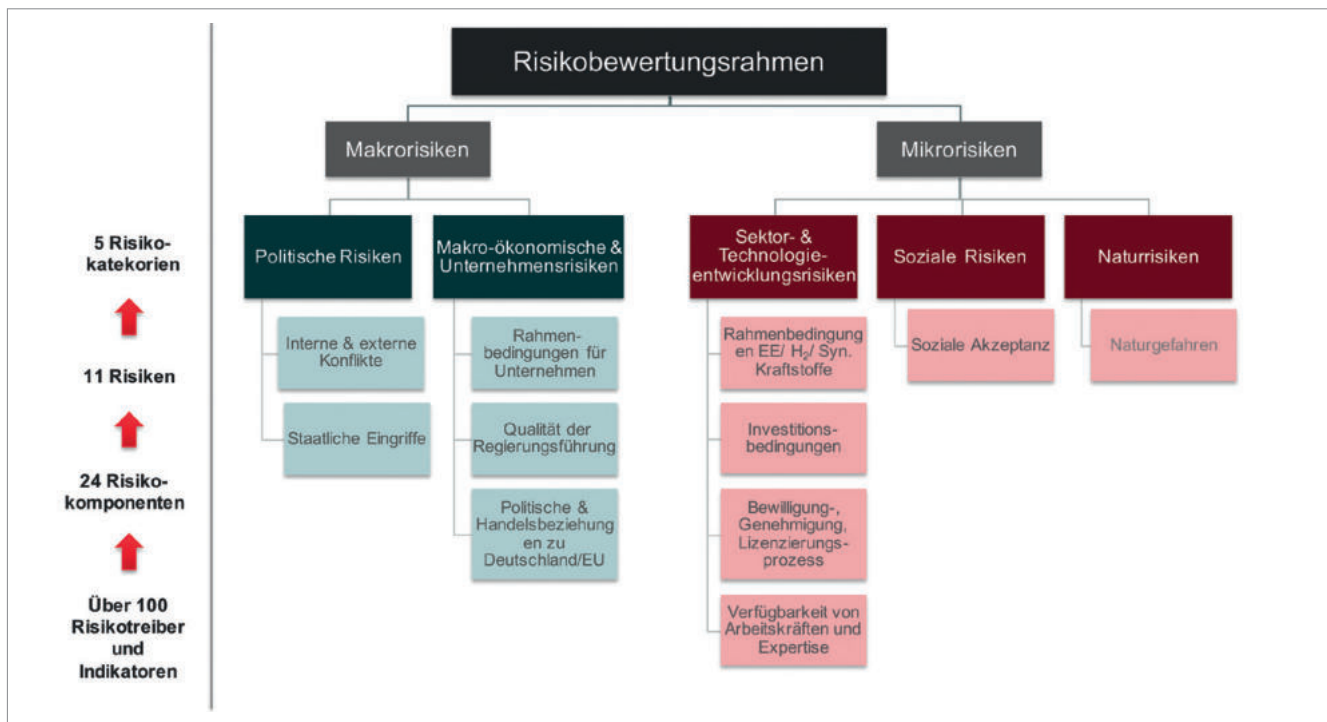


Abbildung 2  
**Risikoanalyse im Projekt MENA-Fuels**  
(Quelle: Terrapon-Pfaff et al. 2020, Wuppertal Institut)

Im Rahmen des Projekts MENA-Fuels<sup>6)</sup> wurden am Wuppertal-Institut 17 Länder der MENA-Region („Middle East & North Africa“) als potenzielle Exportländer analysiert (Terrapon-Pfaff et al. 2020). In diesem deutlich breiter angelegten Ansatz werden für jedes Land über 100 Risikoindikatoren und -treiber in fünf Kategorien (politische & makroökonomische Risiken, sektor- & technologiespezifische Risiken, soziale & Naturrisiken) erhoben und bewertet und in länderspezifische Risikoprämien – d.h. Zinsaufschläge – umgerechnet (► **Abbildung 2**). Die Ergebnisse zeigen, dass – je nach Land und Entwicklung – nicht nur das Potenzial, sondern auch die politischen Risiken eine wichtige Rolle für die Bestimmung der Kosten spielen.

Ein erstes, rein qualitatives Analyseraster wurde am ZSW im Rahmen der Begleitstudie zum Projekt reFuels (Schmidt et al., noch unveröffentlicht) erstellt. Mit zehn techno-ökonomischen und sozio-ökonomischen Kriterien hat die Studie eher universalen Charakter (Länderbeispiele: Norwegen, Spanien, Marokko) und dient einer begleitenden qualitativen Einordnung. Die Kriterien reichen vom EE-Potenzial, CO<sub>2</sub>-Quellen und Wasserverfügbarkeit über politische, energiepolitische, gesellschaftliche und ökonomische Rahmenbedingungen bis hin zur Rolle des Energiesektors im Land und bereits bestehenden Beziehungen.

## Anwendungen

Ein Beispiel für die Bewertung von Anwendungen ist die Ökobilanzierung von Fischer-Tropsch-Benzin, Methan und Methanol zur Nutzung in Pkw. Wiederrum im Projekt BEniVer (s.o.) konnte am DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme (IVE) in Kooperation mit der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (fFe) gezeigt werden, dass die CO<sub>2</sub>-Bilanz im Wesentlichen vom eingesetzten Strom abhängt<sup>7)</sup>. D.h. je geringer die Strommenge und/oder je CO<sub>2</sub>-ärmer der Strommix ist, desto geringer sind die resultierenden Emissionen. In der Folge sind auch die H<sub>2</sub>-Effizienz bei der E-Fuels-Produktion und die Effizienz des Fahrzeugs entscheidend. D.h. je geringer der resultierende H<sub>2</sub>-Bedarf pro zurückgelegter Entfernung, desto geringer die CO<sub>2</sub>-Emission. Ähnlich wie bei der UFZ-Studie wird eine graduelle Dekarbonisierung des deutschen Strommixes bis 2050 angenommen, sodass bis dahin auch graduell die resultierenden Emissionen sinken.

Berechnungen am DLR-Institut für Technische Thermodynamik (TT) veranschaulichen die Kosten von E-Fuels sowie die Bedarfe an EE-Strom und CO<sub>2</sub> am Beispiel des Klimaschutzziels für die europäische Luftfahrt. Aus den Klimaschutzzielen der IATA-Roadmap lässt sich allein für Europa bis 2050 ein jährlicher EE-Kerosinbedarf von min. 60 Mt/a<sup>8)</sup> abschätzen, der einen entsprechenden Zusatzbedarf an EE-Strom und entsprechend konzentriertem CO<sub>2</sub> nach sich zieht. Aufbauend auf Albrecht et al. (2017) wird mit einem ambitionierten energetischen Power-to-Liquid-

Wirkungsgrad von  $n_e = 50\%$  ein jährlicher zusätzlicher EE-Strombedarf von 5,2 EJ (Exajoule) errechnet. Im Vergleich dazu betrug 2018 der gesamte EU-weite Zuwachs an Wind-, Biomasse- und Solarstromproduktion 3,6 EJ/a (VGB 2020, S. 2–3, eigene Berechnungen). Weiterhin wären dafür 186 Mt/a an CO<sub>2</sub> notwendig. Sollen dafür z. B. industrielle Punktquellen genutzt werden, übertrifft der erwartete Luftfahrtbedarf die CO<sub>2</sub>-Emissionen z. B. der gesamten EU-weiten Zementproduktion von 2011 in Höhe von 122 Mt CO<sub>2</sub> deutlich (EU COM o. J., S. 3). Unter Zugrundelegung bestimmter typischer Annahmen (Kosten für EE-Strom, Kosten für fossiles Kerosin) werden CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten in Euro/t berechnet. Diese betragen in einer Beispielrechnung für eine hypothetische 100-kt/a-Anlage in Deutschland (unter der Annahme von EE-Stromkosten von 89 Euro/MWh) im Jahr 2018 975 Euro/t CO<sub>2</sub>. Die Kosten der Emissionsberechtigungen im europäischen Emissionshandelssystem beliefen sich für 2019 hingegen auf durchschnittlich rund 25 Euro/t CO<sub>2</sub> (DEHSt 2020, S. 80).

## Schlussfolgerungen

Was lässt sich aus dem Parforce-Ritt durch die ökonomischen, gesellschaftlichen und ökologischen Nachhaltigkeitsaspekte entlang der Wertschöpfungskette der strombasierten Kraftstoffe (E-Fuels) lernen? Zunächst scheinen die meisten Forschungsprojekte trotz der Vielfalt und Breite noch überwiegend technologisch orientiert zu sein. Das mag darin begründet sein, dass das Forschungsfeld zwar nicht völlig neu ist aber bisher überwiegend ein Nischendasein geführt hat. Durch die eingangs erwähnte gestiegene Dringlichkeit der Defossilisierung des Verkehrs wird nun ein schnelles Verlassen der Nische und ein Markthochlauf erwartet, bei dem allerdings auch eine Reihe „nicht-technischer“ Dimensionen zu beachten sind, wie zahlreiche gesellschaftliche Fragestellungen und Nachhaltigkeitsaspekte. Anhand einiger Projektbeispiele konnten auch diese „nicht-technischen“ Dimensionen von E-Fuels aufgezeigt werden. So wurde anhand der bioliq-Studie die Bedeutung der Integration gesellschaftlicher Einstellungen und Präferenzen in notwendige Abwägungsentscheidungen aufgezeigt und eine technologieoffene, integrative und multikriterielle Nachhaltigkeitsbewertung durchgeführt. Weiterhin widmen sich die Projekte reFuels, MENA-Fuels und BEniVer den E-Fuels-Handelsbeziehungen in einem breiter angelegten Analyserahmen vor dem Hintergrund, dass E-Fuels überwiegend importiert werden müssen. Insbesondere legt das Projekt BEniVer den Fokus auf Fragen der Gestaltung des Markthochlaufs unter der Berücksichtigung des Importaspekts. Andere Studien, die Teilaspekte behan-

deln, weisen auf gesellschaftliche Herausforderungen hin. So legt die Studie zum Luftverkehr die Kosten offen, die alleine die Teil-Defossilisierung dieses Sektors in Europa verursacht, wenn weiterhin der Anspruch bestehen sollte, im vergleichbaren Ausmaß zu fliegen (dass hier durch COVID-19 evtl. erstmals ein Entwicklungspfad beschritten wird, der jenseits aller bisherigen Szenarien liegt, ist Gegenstand späterer Untersuchungen).

Zusammen mit der UFZ- und der DLR IVE/FfE-Studie verweisen alle diese Projekte auf den signifikanten, zusätzlichen EE-Ausbaubedarf, der durch E-Fuels induziert wird. Schließlich adressieren auch „rein technische“ Studien gesellschaftliche Probleme. Sollte es z. B. mit dem Crowd-oil-Projekt gelingen, die bisherigen Probleme des DAC – hohe Kosten, Energie- und Flächenverbrauch – zu begrenzen, hätte auch dies wichtige positive gesellschaftliche Rückwirkungen.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Forschungen zu den gesellschaftlichen Dimensionen zumindest noch „ausbaufähig“ sind. Die Entwicklung einer gesellschaftlichen Gesamtstrategie zur Rolle der E-Fuels und deren Markteinführung steht derzeit noch am Anfang, auch wenn mit der erwähnten nationalen H<sub>2</sub>-Strategie erste Ansätze bestehen.

## Literatur

- Albrecht, F. G., König, D. H., Baucks, N., Dietrich, R. U. 2017: A standardized methodology for the techno-economic evaluation of 1 alternative fuels. *Fuel* 194, S. 511–526.
- BMWi (Hg.) 2020: Die nationale Wasserstoffstrategie. BMWi. Juni 2020. Berlin
- Dittmeyer, R., Klumpp, M., Kant, P., Ozin, G. 2019: Crowd oil not crude oil. *Nature Communications* 10 (2019), Article-nr.: 1818. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09685-x>
- DEHSt 2020: Treibhausgasemissionen 2019. Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2019). Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt. Stand: Mai 2020
- Eggemann, L., Escobar, N., Peters, R., Burauel, P., Stolten, D. 2020: Life cycle assessment of a small-scale methanol production system: A Power-to-Fuel strategy for biogas plants. *Journal of Cleaner Production* 271, Article-nr.: 122476. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122476>
- EU COM o. J.: Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Reduction in the Cement Industry. Technology Information Sheet. Strategic Energies Technologies Information System (SETIS). European Commission.
- Haase, M., Babenhauserheide, N., Rösch, C. 2020: Multi criteria decision analysis for sustainability assessment of 2nd generation biofuels. *Procedia CIRP* 90. S. 226–23. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.124>
- Hank, C., Sternberg, A., Köppel, N., Holst, M., Smolinka, T., Schaadt, A., Hebling, C., Henning, H.-M. 2020: Energy efficiency and economic assessment of imported energy carriers based on renewable electricity. *Sustainable Energy and Fuels* 4(5), S. 2256-2273 DOI: <https://doi.org/10.1039/D0SE00067A>
- Helmholtz Klima Initiative 2020: Factsheet No. 04. Thema: Direct Air Capture. Stand: Sept. 2020
- Markus, T., Schaller, R., Gawel, E., Korte, K. 2021a: Negativemissionstechnologien als neues Instrument der Klimapolitik – Charakteristiken und klimapolitische Hintergründe. *Natur & Recht*, in press (1/2021)
- Markus, T., Schaller, R., Gawel, E., Korte, K. 2021b: Negativemissionstechnologien und ihre Verortung im Regelsystem internationaler Klimapolitik. *Natur & Recht*, in press (2/2021)
- Millinger, M., Tafarte, P., Jordan, M., Hahn, A., Meisel, K., Thrän, D. 2021: Electrofuels from excess renewable electricity at high variable renewable shares: cost, greenhouse gas abatement, carbon use and competition. *Sustainable Energy and Fuels* Pre-print: 10.26434/chemrxiv.12287504
- Peters, R., Decker, M., Eggemann, L., Schemme, S., Schorn, F., Breuer, J. L., Weiske, S., Pasel, J., Samsun, R. C., Stolten, D., 2020: Thermodynamic and ecological preselection of synthetic fuel intermediates from biogas at farm sites. *Energy, Sustainability and Society* 10
- Sauer, J., Müller-Langer, F., Jürgens, S., Peters, R., Hadrach, J., Schaadt, A., Kolb, T., Pfeifer, P., Harnisch, F., Zuberbühler, U. 2021: Synthetische Kraftstoffe – Technologien, Prozessketten, Kohlenstoffquellen, Produkte. Vortrag und Veröffentlichung im diesem Band, S. 43
- Schmidt, M., Bickel, P., Fuchs, A., Püttner, P., Schwarz, S., Wolf, P. noch unveröffentlicht: Begleitstudie zum Forschungsprojekt reFuels. Im Auftrag des Verkehrsministeriums Baden-Württemberg, Stuttgart, noch unveröffentlicht
- Terrapon-Pfaff, J., Ersoy, S., Prantner, M., Viebahn, P., 2020: MENA Fuels. Teilbericht Nr. 1. Risikobewertete Kosten-Potenzial-Analyse (unveröffentlicht)
- VGB 2020: Electricity Generation 2020/2021. VGB Power Tech. Facts and Figures. September 2020

## Fußnoten

- 1) Von der übergangsweisen Nutzung fossiler Prozessemissionen (Stahl-, Zementwerke etc.) wird hier abgesehen
- 2) <http://www.izes.de/de/projekte/beniverbegleitforschung-energiewende-im-verkehr>
- 3) einzige Ausnahme: s. Fußnote 1
- 4) <https://www.netto-null.org/>
- 5) <https://www.dbfz.de/projektseiten/pilot-sbg/>
- 6) <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/789/>
- 7) [https://www.dlr.de/ve/desktopdefault.aspx/tabid-13036/22768\\_read-52944/](https://www.dlr.de/ve/desktopdefault.aspx/tabid-13036/22768_read-52944/)
- 8) Mt/a bezeichnet den Mengenbedarf in Millionen Tonnen pro Jahr.